

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROLETEAMENTO DE VIRABREQUINS

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOVIANO JANJAR CASARIN

Florianópolis, agosto de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROLETEAMENTO DE VIRABREQUINS

JOVIANO JANJAR CASARIN

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final

---

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner  
Orientador

---

Prof. Dr. Fernando Cabral – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

---

Eduardo Alberto Fancello Dr. Sc.

---

Dr. Eng. Carlos Augusto Oliveira

---

Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau

“Mas não basta pra ser livre,  
ser forte, aguerrido e bravo;  
povo que não tem virtude,  
acaba por ser escravo”

Trecho do Hino do Rio Grande do Sul

À minha noiva Grazielle,  
pelo apoio e principalmente pela  
compreensão nos momentos  
em que estive ausente

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Weingaertner pela orientação e por proporcionar o contato com diferentes áreas do conhecimento e, acima de tudo, pela confiança.

Ao Prof. Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter pela cooperação nos trabalhos desenvolvidos, pela amizade e pelo exemplo de vivência e dedicação ao trabalho.

Ao Prof. Dr. Eng. Sandi Itamar Schäffer de Souza pela indicação ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC e pelo apoio incondicional nos momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Eng. André João de Souza pela indicação ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFSC e pelo apoio nos trabalhos desenvolvidos.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por proporcionar o ingresso no Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Fundo Verde e Amarelo e o Projeto de Otimização de Processos de Fabricação de Componentes de Motores Automotivos firmado entre a FINEP, a RENAULT DO BRASIL, FEESC e LMP.

À empresa Hegenscheidt-MFD, Erkelenz – Alemanha, pelo treinamento desenvolvido e pelas informações prestadas para a confecção deste trabalho. Também pela doação do equipamento necessário para realização de testes no LMP.

Ao Dr.-Ing. Helmut Hochbein e sua equipe de trabalho pelo apoio e cooperação nos estudos desenvolvidos durante a permanência na Hegenscheidt.

Aos colaboradores do Laboratório de Mecânica de Precisão que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os meus familiares, especialmente meus pais, pelo apoio e auxílio em todos os momentos.

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	5
SUMÁRIO .....	6
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE SÍMBOLOS.....	12
RESUMO .....	13
ABSTRACT .....	14
1 INTRODUÇÃO .....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	18
2.1 Comportamento Mecânico de Materiais sob Fadiga .....	18
2.1.1 Nucleação e Crescimento de Trincas .....	19
2.1.2 Efeito dos Concentradores de Tensões .....	22
2.1.3 Métodos para Redução do Efeito dos Concentradores de Tensões.....	24
2.2 Roletamento de Virabrequins .....	26
2.2.1 Características do Processo de Roletamento .....	26
2.2.2 Força de Roletamento.....	31
2.2.3 Influência do Número de Rotações .....	35
2.2.4 Raio de Concordância.....	36
2.2.5 Ferramentas de Roletamento .....	38
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	44
3.1 Realização de Ensaio Prático de Roletamento .....	44
3.1.1 Características dos Corpos de Prova Utilizados .....	44
3.1.2 Características das Ferramentas de Roletamento .....	46
3.1.3 Variáveis de Entrada.....	47
3.1.4 Técnicas de medição.....	48
3.1.5 Equipamentos e Dispositivos .....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	52
4.1 Comprimento do Virabrequim .....	52
4.2 Raio de Concordância .....	56
4.2.1 Variação do raio de concordância com a força de roletamento.....	59

4.2.2	Variação no raio de concordância em função do limite de resistência do material .....	60
4.3	Profundidade de Penetração da Ferramenta.....	62
4.4	Coaxialidade dos Mancais do Virabrequim .....	65
4.5	Correlação de Parâmetros no Processo de Roleteamento .....	67
5	CONCLUSÕES .....	69
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros .....	71
6	REFERÊNCIAS.....	72
7	PROJETO DE UMA BANCADA DE ROLETEAMENTO .....	75

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fases do processo de ruptura por fadiga [2] .....	18
Figura 2.2 – Etapa de formação (nucleação) de trincas em um material [5] .....	19
Figura 2.3 – Representação das fases de propagação de uma trinca de fadiga [2] .....	20
Figura 2.4 – Formação de extrusões e intrusões na superfície de um componente [2]....	21
Figura 2.5 – Distribuição do campo de tensões e o efeito do entalhe na seção A-A [3] .....	22
Figura 2.6 – Valores de um concentrador de tensão típico em função da geometria [3] .....	23
Figura 2.7 – Sobreposição das tensões residuais com as tensões do esforço cíclico. a) distribuição de tensões em um eixo sob flexão; b) perfil característico das tensões residuais inseridas na peça; c) aspecto resultante da sobreposição de tensões [6] .....	25
Figura 2.8 – (a) Exemplo de um virabrequim; (b) Região onde o roleteamento é executado [7].....	26
Figura 2.9 – Modo de aplicação da força no processo de roleteamento de virabrequins.....	27
Figura 2.10 – Região afetada pela deformação plástica induzida pelo rolete .....	27
Figura 2.11 – Cinemática do processo de roleteamento de virabrequins [8] .....	28
Figura 2.12 – Deformação local ocasionada pela ferramenta de roleteamento [8] .....	29
Figura 2.13 – Efeito do roleteamento sobre o alinhamento do virabrequim [9] .....	30
Figura 2.14 – Subdivisão da seção do munhão do virabrequim para o roleteamento setorial.....	30
Figura 2.15 – (a) Trajetórias percorridas pelos roletes; (b) Comportamento da força no roleteamento setorial .....	31
Figura 2.16 – Influência da força de roleteamento sobre a vida em fadiga [10].....	32
Figura 2.17 – Parâmetros de seleção para a constante D da equação (2.3). (a) Roleteamento em eixos cilíndricos. (b) Roleteamento de virabrequim [10].....	33
Figura 2.18 – Influência do número de rotações sobre a vida em fadiga de um componente de ferro fundido no processo de roleteamento [9] .....	35
Figura 2.19 – Efeito do número de rotações sobre a vida em fadiga de um componente de aço no processo de roleteamento [9] .....	36
Figura 2.20 – Efeito do tamanho do raio de concordância sobre a resistência à fadiga de acordo com Wright <i>et. al.</i> [10] .....	37
Figura 2.21 – Comportamento do raio de concordância no processo de roleteamento [10] .....	38
Figura 2.22 – Cabeçote de ferramentas para roleteamento de virabrequins [11] .....	39



---

Figura 2.23 – Cabeçote de ferramentas para apoio dos mancais durante a operação [11] .....	39
Figura 2.24 – Ferramentas de roleteamento de esferas e acionamento mecânico [8] ....	40
Figura 2.25 – Ferramentas de roleteamento acionadas hidraulicamente [13] .....	41
Figura 2.26 – Condições de utilização das ferramentas de roleteamento .....	41
Figura 2.27 – Influência da geometria do raio de concordância do virabrequim sobre a vida da ferramenta. a) Distribuição de tensões na geometria antiga; b) Geometria otimizada [14] .....	42
Figura 3.1 – Geometria e dimensões dos virabrequins utilizados nos testes .....	45
Figura 3.2 – Ilustração das ferramentas (roletes) utilizadas nos ensaios de roleteamento .....	46
Figura 3.3 – Execução da técnica de reprodução do raio de concordância dos virabrequins.....	48
Figura 3.4 – Medição do raio de concordância com o perfilômetro .....	48
Figura 3.5 – Execução dos testes na bancada de ensaios .....	49
Figura 3.6 – Equipamento de medição digital utilizado para determinar o comprimento do virabrequim e o afastamento entre as faces dos munhões .....	50
Figura 3.7 – Perfilômetro para medição do raio de concordância e profundidade de penetração dos roletes de trabalho.....	50
Figura 3.8 – Montagem do relógio comparador para avaliação da coaxialidade do virabrequim .....	51
Figura 3.9 – Procedimento de medição da coaxialidade do virabrequim.....	51
Figura 4.1 – Comprimento do virabrequim em função do limite de resistência do material .....	54
Figura 4.2 – Compensação da variação dimensional do raio de concordância do virabrequim pelo auto-ajuste das ferramentas montadas no cabeçote de roleteamento .....	56
Figura 4.3 – Perfis obtidos na medição do raio de concordância antes e após o roleteamento .....	57
Figura 4.4 – Comportamento do raio de concordância em função do limite de resistência do material. (a) Mancal 2; (b) Mancal 4; (c) Mancal 5 .....	58
Figura 4.5 – Comportamento do raio de concordância em função da força de roleteamento. a) Raios orientados para o lado eixo; b) Raios orientados para o lado do flange .....	60
Figura 4.6 – Variação do raio de concordância em função do material utilizado. a) Raios orientados para o lado do eixo; b) raios orientados para o lado do flange.....	61
Figura 4.7 – Profundidade de penetração da ferramenta na peça com o limite de resistência .....	62
Figura 4.8 – Profundidade de penetração do rolete como função da força de roleteamento .....	64
Figura 4.9 – Alinhamento dos mancais dos virabrequins – <i>run-out</i> .....	67

---

Figura 4.10 – Variáveis de influência sobre o resultado de trabalho no processo de roleteamento .....	68
Figura 7.1 – Concepção da bancada de roleteamento.....	76
Figura 7.2 – Cabeçote de acionamento para a bancada de roleteamento .....	76
Figura 7.3 – Sistema de guias lineares para fixação e movimentação do braço de roleteamento .....	77
Figura 7.4 – Braço articulado para a bancada de ensaios de roleteamento .....	78
Figura 7.5 – Diagrama hidráulico do cilindro de aplicação da força de roleteamento...	79
Figura 7.6 – Esquema hidráulico do sistema de posicionamento dos braços de roleteamento .....	79

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características mecânicas dos virabrequins utilizados nos testes de roleteamento .....	44
Tabela 3.2 – Características mecânicas das ferramentas de roleteamento .....	46
Tabela 3.3 – Metodologia de execução dos ensaios de roleteamento .....	47
Tabela 3.4 – Proposta 2 de análise dos dados do processo de roleteamento de virabrequins .....	47

---

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

D	[in]	Parâmetro geométrico
F	[N]	Força
$F_R$	[N] [tf]	Força de roleteamento
$F_{RI}$	[N] [tf]	Limite inferior da força de roleteamento
$F_{RS}$	[N] [tf]	Limite superior da força de roleteamento
I	[m <sup>4</sup> ]	Momento de inércia
K	[-]	Constante adimensional
$K_C$	[-]	Fator de concentração de tensões
M	[N·m]	Momento de flexão
R	[in]	Raio de concordância
Ra	[μm]	Rugosidade média da superfície
Z	[m <sup>3</sup> ]	Módulo de resistência à flexão
d	[m]	Diâmetro
h	[m]	Extensão da área de aplicação do momento flexão
$r_\epsilon$	[m]	Raio do rolete (ferramenta)
rp	[m]	Raio da peça
$\sigma$	[N/m <sup>2</sup> ]	Tensão
$\sigma_{max}$	[N/m <sup>2</sup> ]	Tensão de flexão máxima
$\sigma_{nom}$	[N/m <sup>2</sup> ]	Tensão de flexão nominal
$\sigma_R$	[N/ m <sup>2</sup> ] [tf/in <sup>2</sup> ]	Limite de resistência do material

---

## RESUMO

Com o intuito de reduzir o consumo de combustível dos motores, as indústrias automotivas procuram desenvolver produtos cada vez mais leves e ao mesmo tempo mais resistentes. Neste contexto o projeto e a fabricação de componentes que serão submetidos a condições severas de serviço, devem ser tais que atendam aos requisitos estabelecidos. Para tanto é necessário conhecer claramente as características dos processos de fabricação utilizados, bem como a interação das variáveis envolvidas. No caso específico de virabrequins, os quais operam sob elevadas solicitações cíclicas, diversos processos são necessários até a obtenção da geometria final. Dentre estes processos destaca-se o roleteamento profundo (*deep-rolling*, *galetage*, *Festwalzen*). Esta operação é realizada com o objetivo de elevar a resistência à fadiga do virabrequim e também corrigir empenamentos oriundos da própria operação de roleteamento bem como dos processos de usinagem. Basicamente é um processo de conformação mecânica, no qual são utilizados roletes-ferramenta responsáveis por induzir tensões residuais compressivas em camadas próximas à superfície do raio de concordância dos mancais e munhões do virabrequim. Devido ao estado de tensões residuais compressivas, esta região apresenta um aumento da dureza e resistência mecânica. Como o virabrequim possui uma geometria relativamente complexa e, ao aplicar uma determinada força as deformações resultantes não apresentam uma direção preferencial é de extrema importância identificar a correlação existente entre as variáveis do processo, principalmente no que diz respeito à força de roleteamento. Diversos autores têm desenvolvido pesquisas a respeito do roleteamento de virabrequins há vários anos. Porém, na maioria dos casos a seleção dos parâmetros do processo é realizada empiricamente e em grande parte, baseada na experiência de operadores. Motivado pela necessidade de um melhor entendimento do processo, o trabalho apresenta os resultados de um levantamento de dados a respeito da operação e, através da aplicação de diferentes níveis de força de roleteamento foi realizada uma avaliação do comportamento geométrico do virabrequim bem como do raio de concordância.

---

## ABSTRACT

In order to reduce the fuel consumption in automotive motors, manufacturers search for development of not only lighter but also more resistant products. This way, the design and manufacturing of components that will be submitted to severe work conditions must attend to established requirements. Thus, it is necessary to know clearly both characteristics of manufacturing process and interaction of variables involved. For the crankshaft, which operates under high alternate stresses, several manufacturing processes are necessary to obtain definite geometry. Among these processes deep-rolling (*galetage*, *Festwalzen*) earns eminence, once this operation is performed aiming to increase the fatigue life of crankshaft and to correct run-outs derived from machining process and own operation. Basically it is a forging process, in which rollers are responsible for inducing residual stresses on layers next to surface of fillet radius of crankshaft bearings and journals. Due to the condition of compressive residual stresses, this area shows an enlargement of hardness and mechanical strength. Crankshaft shows relatively complex geometry and, at the moment of force application the resultant deformations do not show a preferential direction. For this reason it is very important to identify the correlation existent among process variables, mainly related to deep-rolling force. Several authors have developed researches related to deep-rolling of crankshafts since years ago. However, in most of cases the selection of process parameters is conducted empirically and also, based on experience of operators. Motivated by need better understanding of the process, this work exhibit the results of collected data related to deep-rolling process. Through the application of different configurations for deep rolling force, an evaluation of the geometry behaviour of crankshaft as well as fillet radius was also developed.

---

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de fabricação de virabrequins é composto de várias etapas responsáveis por conferir a sua geometria final, empregando diversos processos de fabricação. Um processo complementar denominado de Roleteamento Profundo (*Deep-rolling*, *Festwalzen*, *Galetage*) é empregado, principalmente em virabrequins de ferro-fundido. A operação de roleteamento consiste em introduzir tensões residuais compressivas em camadas próximas à superfície de componentes. Com isso tem-se a elevação da dureza e resistência mecânica da região conformada devido aos efeitos do encruamento da micro-estrutura do material e, conseqüentemente, um aumento do tempo de vida dos componentes, principalmente quando submetidos a esforços alternados.

Elementos mecânicos submetidos a solicitações dinâmicas apresentam colapso sob tensões abaixo do limite de resistência do material, principalmente quando estes elementos possuem variações bruscas no seu formato e/ou irregularidades na micro-estrutura, que atuam como concentradores de tensões. O aumento da vida de um componente submetido a tensões alternantes pode ser obtido por modificações na geometria e nas características do material em regiões próximas à superfície do componente. Modificações geométricas nem sempre são possíveis de serem executadas, porém modificações nas características do material da peça podem ser realizadas através de alterações na micro-estrutura por meio de tratamentos térmicos ou mecânicos, tais como: nitretação, cementação, endurecimento por indução, forjamento, *shot-peening*, roleteamento, entre outros.

O virabrequim é um componente do motor do automóvel o qual, além de submetido a esforços alternados durante o funcionamento, apresenta variações de seções acentuadas na sua geometria. Estas variações bruscas de seção atuam como concentradores de tensões, que reduzem o tempo de vida do virabrequim. Os raios de concordância entre a junção do mancal com o munhão do virabrequim são exemplos de

concentradores de tensões, onde a nucleação e o crescimento de trincas por fadiga são bastante propícios. Com o objetivo de elevar a resistência à fadiga do virabrequim torna-se necessário introduzir tensões residuais compressivas nestas regiões.

Estudos conduzidos por Randlet [1] mostram significativos aumentos na vida em fadiga de virabrequins submetidos ao processo de roleteamento. Apesar do processo de roleteamento ser utilizado há vários anos e por diversas empresas, não se dispõe ainda de informações abrangentes a respeito da operação. Muitas destas informações estão de posse de um pequeno número de pesquisadores e na maioria dos casos, de operadores de linhas de produção. Nos últimos anos, pesquisadores têm dedicado esforços no intuito de compreender melhor a interação das variáveis envolvidas e suas influências sobre o processo de roleteamento de virabrequins, entretanto, são necessários ainda vários estudos para otimização de parâmetros e avaliação do desempenho de componentes submetidos ao processo de roleteamento. Uma das variáveis influentes está relacionada à dimensão do virabrequim. Vários problemas aparecem quando se necessita gerar dados para virabrequins de tamanhos utilizados em automóveis e transferi-los para virabrequins que extrapolam estas dimensões. É preciso realizar uma quantidade expressiva de testes para dominar o comportamento do virabrequim em relação às variáveis de entrada, tais como: força de roleteamento, dimensão dos roletes, dimensão do raio de concordância do virabrequim, material do virabrequim e dos roletes e o número de revoluções dos roletes sobre a superfície a ser trabalhada.

Este trabalho tem como objetivo promover um melhor entendimento do processo de roleteamento de virabrequins. Um estudo baseado na literatura visa esclarecer os mecanismos de nucleação e propagação de trincas de fadiga, o efeito de mudanças na seção transversal e a geometria do raio de concordância do virabrequim. Além disto, o processo de roleteamento de virabrequins será detalhado com base nas informações da literatura, fabricantes de máquinas-ferramenta e pessoas envolvidas com linhas de produção do processo, identificando e detalhando as variáveis de entrada da operação e sua influência sobre o resultado de trabalho. Dentre estas variáveis destacam-se: a força de roleteamento e as propriedades mecânicas dos virabrequins testados. Uma



investigação sobre a influência da força de roleteamento e a resistência do material do virabrequim será realizada para avaliar o comportamento geométrico dos componentes.

De acordo com os fabricantes, é difícil prever o comportamento do virabrequim submetido ao roleteamento mediante a modificação das variáveis de processo, principalmente quando os virabrequins trabalhados fogem às dimensões utilizadas em automóveis ou possuem formas geométricas mais complexas. Visando suprir esta carência de dados, foram realizados ensaios práticos na empresa responsável pela fabricação das máquinas de roleteamento, Hegenscheidt-MFD, onde foram levantadas informações a respeito da operação junto aos operadores e com a participação da equipe de pesquisa e desenvolvimento.

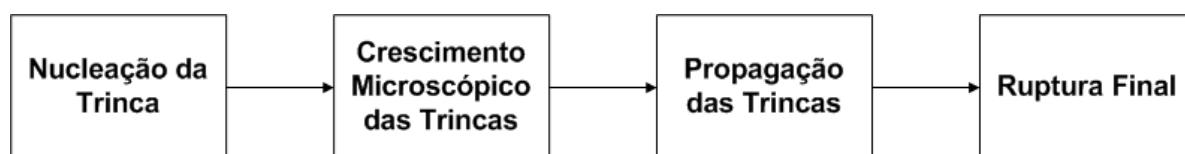
Baseado nos resultados obtidos e na experiência adquirida nos ensaios realizados na empresa Hegenscheidt-MFD em Erkelenz na Alemanha, será proposto a construção de um dispositivo de roleteamento de virabrequins. Este dispositivo deverá ser construído no LMP (Laboratório de Mecânica de Precisão) com a colaboração da Hegenscheidt-MFD. Uma das atividades relacionadas ao o trabalho diz respeito ao projeto de uma bancada para a realização de ensaios de roleteamento. Através da utilização de um sistema composto por um par de braços de roleteamento de virabrequins, doados pela empresa Hegenscheidt-MFD, foi idealizada a concepção do projeto de uma bancada de roleteamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Comportamento Mecânico de Materiais sob Fadiga

Componentes submetidos a solicitações dinâmicas intensas apresentam fratura caracterizada por fadiga. Estima-se que entre 80 e 90% de todas as rupturas de peças ou estruturas submetidas a esforços mecânicos alternantes que operam a temperatura ambiente, são ocasionadas pelos efeitos de fadiga [2, 3]. A fadiga pode ser definida como o “fenômeno de enfraquecimento progressivo de um metal quando este é submetido a solicitações dinâmicas” [2, 3]. A ASTM define fadiga como sendo “um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões ou extensões dinâmicas num ponto ou em vários pontos, que podem culminar em trincas ou uma fratura completa após um número de variações de carga” [4].

O processo de ruptura por fadiga é caracterizado pela propagação de trincas que aparecem em um componente submetido a tensões de tração dinâmicas ou tensões alternantes. Esta configuração de tensões provoca o colapso de componentes abaixo do limite de resistência do material. A **Figura 2.1** ilustra os estágios de progressão do processo de ruptura por fadiga.



**Figura 2.1** – Fases do processo de ruptura por fadiga [2]

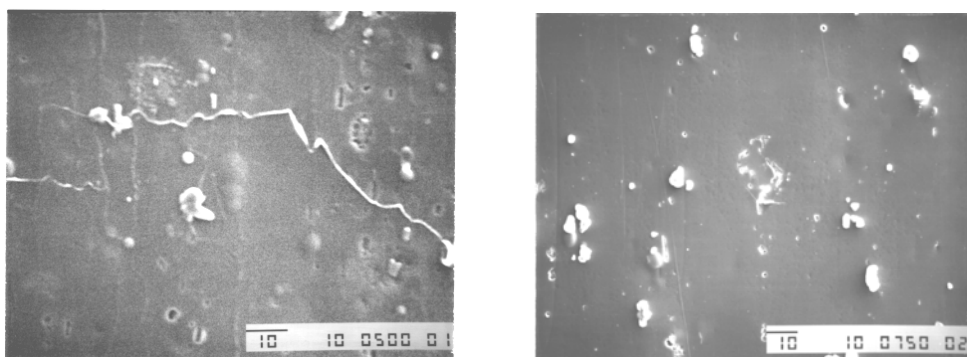
Para que a ruptura por fadiga de um determinado componente ocorra é necessário que haja a atuação de três variáveis em conjunto, classificadas como:

- Tensão Cíclica;
- Tensão de Tração;
- Deformação Plástica.

Se alguma destas variáveis não estiver presente, a trinca por fadiga não irá iniciar e tampouco propagar-se no material [4]. A tensão cíclica e a deformação plástica iniciam a trinca, enquanto que a tensão de tração provoca a propagação da trinca. Embora as tensões compressivas não promovam a propagação das trincas, as solicitações alternantes de tração e compressão conduzem a danos por fadiga [4].

### 2.1.1 Nucleação e Crescimento de Trincas

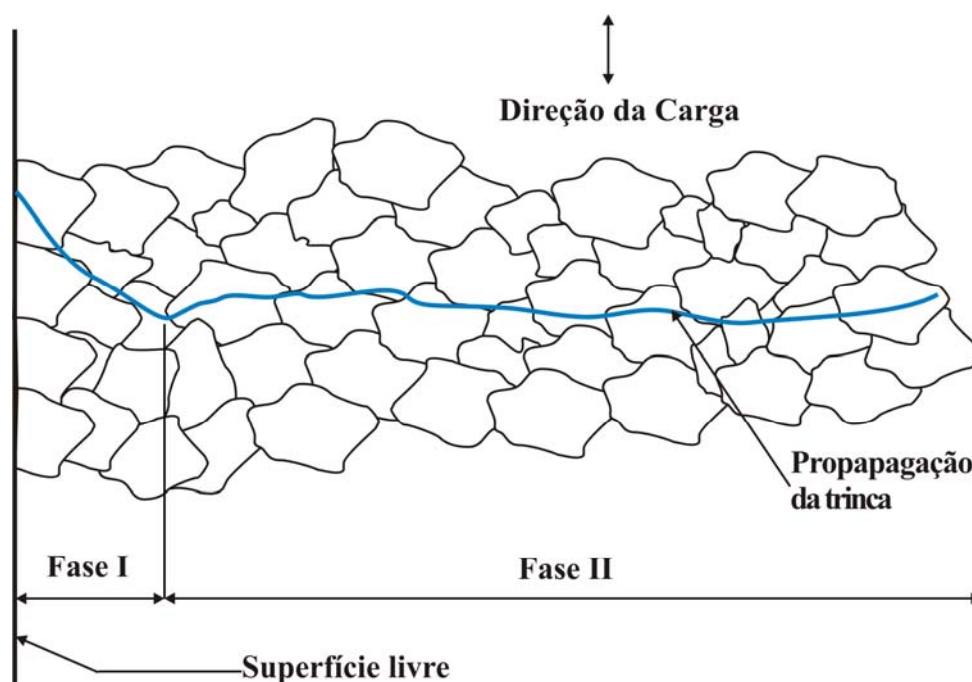
A trinca de fadiga tem sua origem na superfície de uma peça sob solicitação alternada ou abaixo da superfície quando esta apresentar inclusões e defeitos na sua micro-estrutura, a ponto de interferir significativamente na resistência à fadiga [2, 3, 4]. O processo de nucleação destas trincas é mais fácil na superfície das peças em virtude da deformação plástica dos grãos cristalinos não encontrar grandes dificuldades para movimentar-se sobre os planos de escorregamento preferenciais. Os grãos que estão localizados em regiões mais afastadas da superfície do material apresentam maiores restrições quanto à deformação e, por isso é mais difícil ocorrer a nucleação e a propagação de trincas nestas regiões [2, 3]. Como os materiais utilizados em aplicações de engenharia apresentam inclusões e defeitos na sua micro-estrutura, estas descontinuidades agem como concentradores de tensões que acabam por intensificar as solicitações mecânicas. Desta maneira, muitas trincas têm sua origem e a partir destes defeitos estruturais. A **Figura 2.2** ilustra o exemplo do estágio de formação ou nucleação de uma trinca em um dado material.



**Figura 2.2** – Etapa de formação (nucleação) de trincas em um material [5]

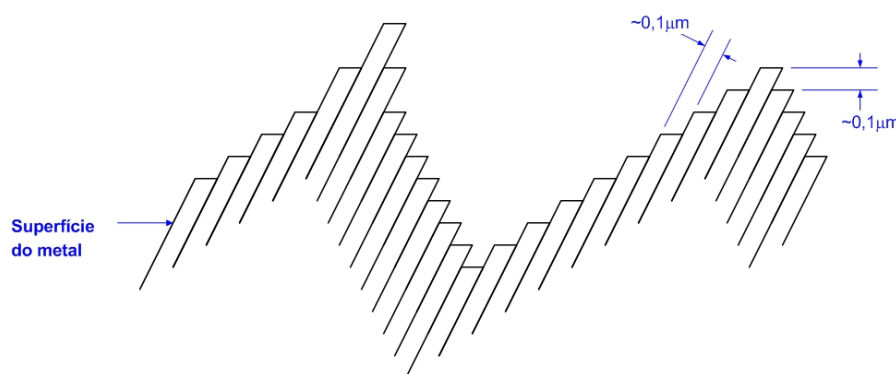
A nucleação da trinca é o estágio inicial do processo de fadiga de um componente solicitado ciclicamente, de acordo com a **Figura 2.1**. Após a nucleação segue o crescimento da trinca até a ruptura total. A nucleação de trincas por fadiga é originada por tensões cíclicas que apresentam magnitudes inferiores ao limite de resistência do material [4]. A introdução de tensões residuais compressivas em camadas próximas à superfície do material, seja por tratamento térmico de têmpera localizado ou por conformação mecânica, reduz a susceptibilidade à fadiga e a nucleação de trincas se dá apenas em níveis de tensões mais elevados.

A trinca original possui dimensões da ordem de micrometros e não pode ser identificada a olho nu. A trinca original caracteriza a fase I do processo de ruptura por fadiga. A fase I se estende até que a trinca tenha atingido dimensões da ordem de alguns tamanhos de grãos, aproximadamente de 2 a 5 grãos, como ilustrado na **Figura 2.3**. Após a fase I, a trinca sofre uma inflexão e passa a propagar-se segundo a direção perpendicular à tensão principal máxima, caracterizando a fase II da trinca. A trinca da fase II possui uma dimensão tal que pode ser vista sem o auxílio de microscópio, e o seu crescimento pode ser descrito pelos métodos da mecânica da fratura [2, 3].



**Figura 2.3** – Representação das fases de propagação de uma trinca de fadiga [2]

Em função da aplicação de cargas alternadas linhas de escorregamento começam a formar-se na estrutura dos grãos próximos à superfície do componente já no início da vida da peça. Estas linhas de escorregamento apresentam elevada densidade de deslocamentos, que poderão tornar-se irreversíveis em função do empilhamento preferencial dos planos de escorregamento [2, 3]. Devido a este fenômeno a deformação plástica apresenta uma intensidade maior nestas bandas de escorregamento e, após uma determinada quantidade de ciclos de aplicação de carga começam a se formar regiões de deformação plástica que se tornam salientes à superfície da peça. Estas saliências são denominadas de extrusões (quando o deslocamento de material é para o exterior da peça) ou de intrusões (quando o deslocamento de material é para o interior do material). A **Figura 2.4** ilustra de forma esquemática a configuração destas extrusões e intrusões (deslocamentos).



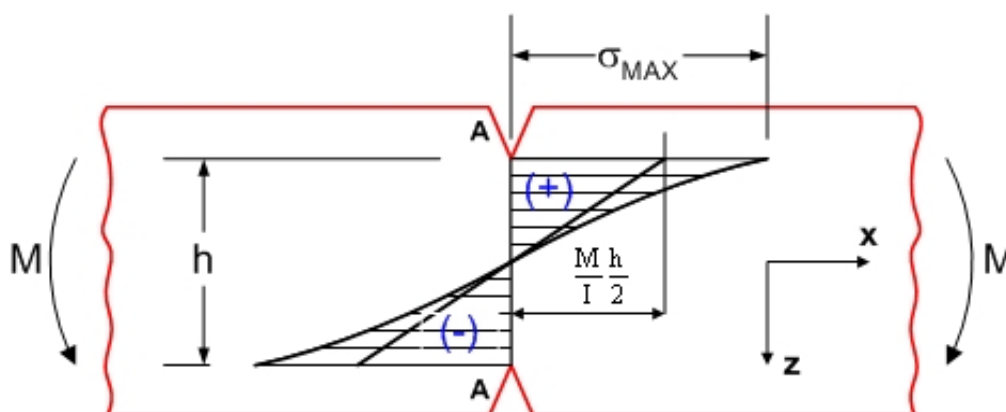
**Figura 2.4** – Formação de extrusões e intrusões na superfície de um componente [2]

Nestas zonas de extrusões e intrusões, devido ao efeito do entalhe, a concentração de tensões é bastante elevada. A tensão localizada nestas zonas pode atingir valores tais que ultrapassem o limite de escoamento do material, provocando assim o surgimento de micro-fendas ou fissuras que, em conjunto com a magnitude e o número de repetições da solicitação, provocam o início ou a nucleação de uma trinca. Este mecanismo de nucleação de trincas ocorre em materiais dúcteis que admitam uma deformação plástica significativa [2, 3].

Em materiais dúcteis a nucleação das trincas geralmente inicia-se nos contornos dos grãos cristalinos para tensões nominais relativamente elevadas. A deformação plástica pode estender-se por todo o grão e o início da trinca ocorre em função da multiplicação de cavidades pela formação de vazios originados no início da vida da peça [2, 3]. Em materiais de alta resistência, como ligas polifásicas, a formação de trincas ocorre nas discontinuidades na superfície da peça, como inclusões não-metálicas, partículas extremamente duras ou cavidades e inclusões que não foram totalmente dissolvidas durante o processo de obtenção do material.

### 2.1.2 Efeito dos Concentradores de Tensões

As necessidades funcionais de componentes mecânicos exigem que os mesmos apresentem variações de seção ao longo da sua extensão. Estas variações podem ser: rebaixos, orifícios, ranhuras, estrias, sulcos, entalhes, entre outros. Quando o componente é submetido a uma solicitação, observa-se que o gradiente de tensões é significativo nas regiões próximas a estas discontinuidades geométricas. A **Figura 2.5** mostra um componente com um entalhe na seção A-A, solicitado por um momento fletor  $M$  e a correspondente distribuição do campo de tensões resultante. As tensões próximas à fronteira da discontinuidade possuem valores mais elevados, se comparados com as tensões em regiões mais afastadas. Este fenômeno é denominado de Concentração de Tensões [2, 3].



**Figura 2.5** – Distribuição do campo de tensões e o efeito do entalhe na seção A-A [3]

A tensão máxima de flexão na seção em que a distribuição de tensões é dada pela equação (2.1).

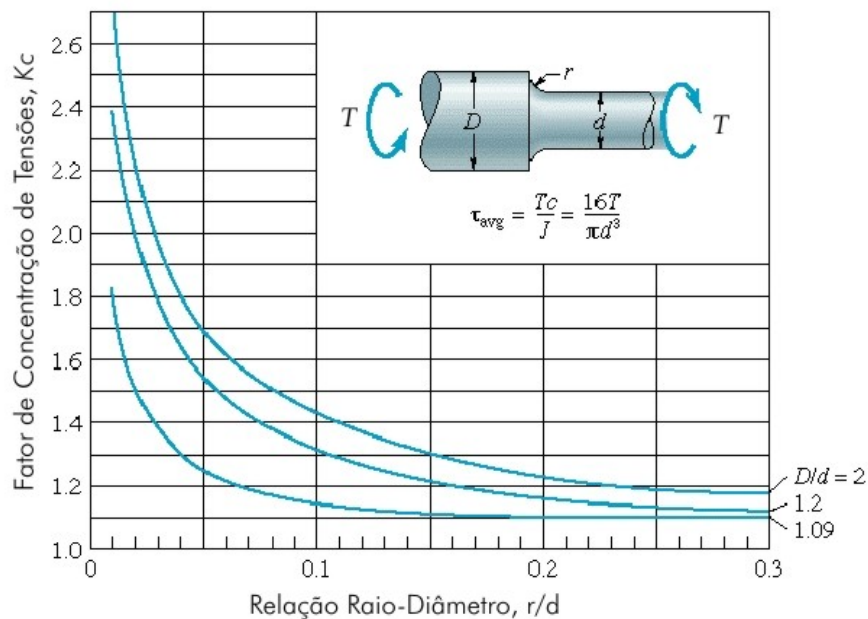
$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{M}{I} \frac{h}{2} \quad (2.1)$$

onde:  $\sigma$  é a tensão de flexão ( $\text{N/m}^2$ ),  $M$  é o momento fletor ( $\text{N}\cdot\text{m}$ ),  $Z$  é o módulo de resistência à flexão da seção transversal ( $\text{m}^3$ ),  $I$  é o momento de inércia ( $\text{m}^4$ ) e  $h$  é extensão da área de aplicação do momento fletor ( $\text{m}$ ).

O Fator de Concentração de Tensões ( $K_C$ ) é dado pela relação entre a tensão máxima na fronteira da descontinuidade e a tensão nominal na seção transversal, equação (2.2).

$$K_C = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nom}}} \quad (2.2)$$

onde:  $\sigma_{\max}$  é a tensão máxima na fronteira da descontinuidade ( $\text{N/m}^2$ ) e  $\sigma_{\text{nom}}$  é a tensão nominal ( $\text{N/m}^2$ ). O efeito da concentração de tensões é amplamente discutido na literatura e apresentado graficamente para o usuário. A **Figura 2.6** exemplifica para um eixo cilíndrico escalonado o fator  $K_C$ .



**Figura 2.6** – Valores de um concentrador de tensão típico em função da geometria [3]

### 2.1.3 Métodos para Redução do Efeito dos Concentradores de Tensões

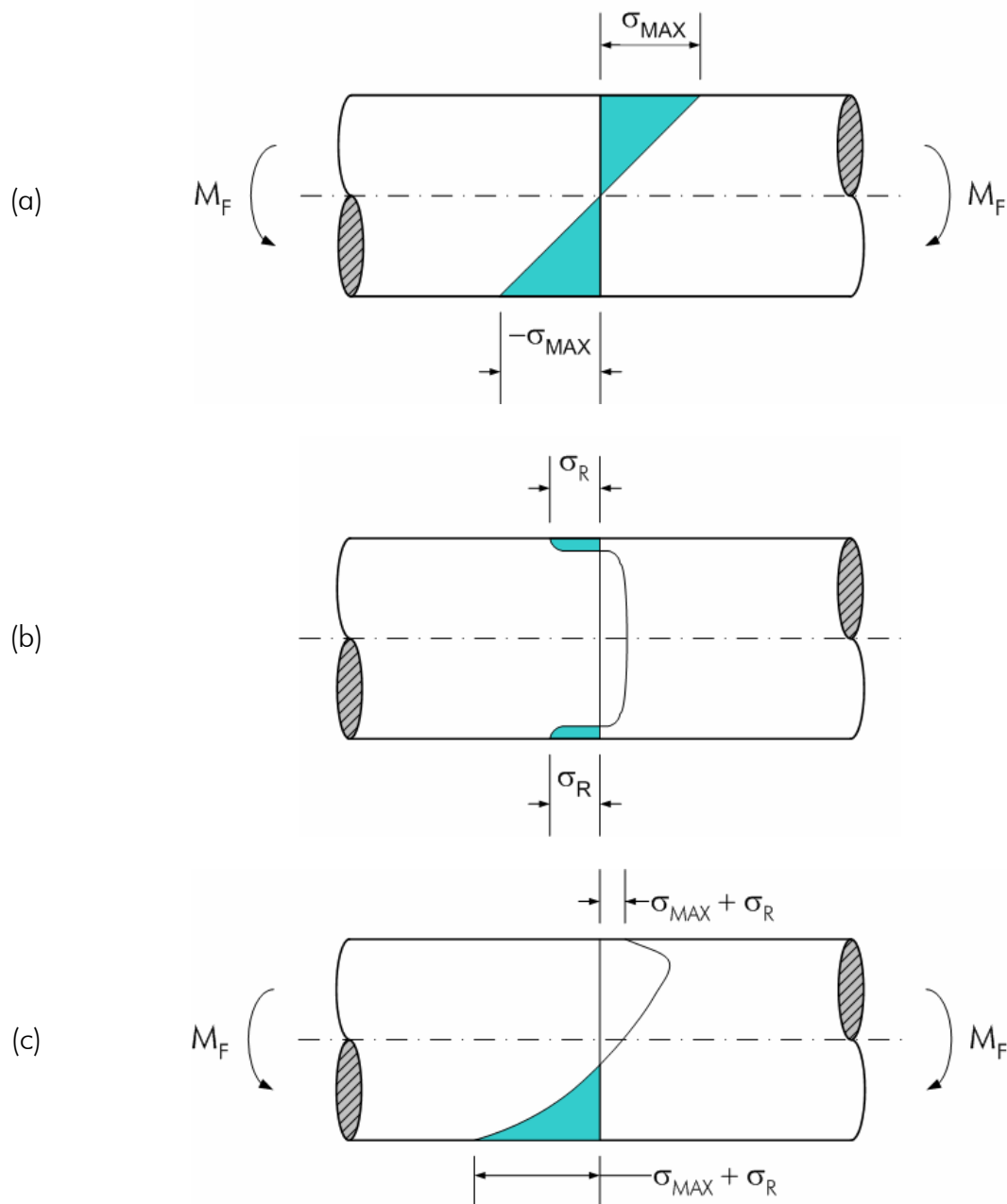
Através de modificações na micro-estrutura do material é possível obter uma melhora das propriedades mecânicas como dureza e resistência mecânica. Dependendo do nível e do tipo de solicitação a que um determinado componente é submetido, vários métodos para aumento da resistência mecânica podem ser empregados. Dentre estes métodos estão os tratamentos térmicos (têmpera, cementação, nitretação etc.), e os métodos de conformação a frio, os quais, em função do encruamento do material, proporcionam um aumento da dureza e resistência mecânica devido aos efeitos da deformação plástica.

A maior parte das falhas por fadiga de componentes tem sua origem a partir da nucleação de trincas na superfície do material. De acordo com Maluf [6], para solicitações comuns, como flexão e torção, as tensões cíclicas atingem valores máximos na superfície, e é neste local onde ocorre a nucleação de trincas por fadiga. Desta maneira, o comportamento do material submetido a esforços alternantes é significativamente dependente da geometria e das condições das camadas próximas à superfície em relação a tensões residuais e propriedades mecânicas do material [6].

Submeter um componente a um processo que atue no sentido de elevar a resistência da superfície do material, o resultado é um aumento da vida em fadiga do componente. Este aumento da vida em fadiga é alcançado pela introdução campos de tensões residuais compressivas em camadas próximas à superfície do material. As tensões residuais compressivas atuam de forma a reduzir as tensões residuais de tração que ocorrem na superfície da peça, além de influenciar o crescimento de trincas por fadiga e reduzindo a sua taxa de propagação ou até mesmo impedindo o seu crescimento [6].

Ao aplicar esforços alternantes em um componente com tensões residuais compressivas nas camadas próximas à superfície, as tensões resultantes da solicitação se unem às tensões residuais. O nível crítico das tensões trativas, que levam à nucleação e propagação de trincas, não é atingido para valores bem mais elevados de esforço do que para um componente sem tensões residuais compressivas. A **Figura 2.7(c)** ilustra a sobreposição das tensões oriundas da solicitação e as tensões residuais geradas no material.





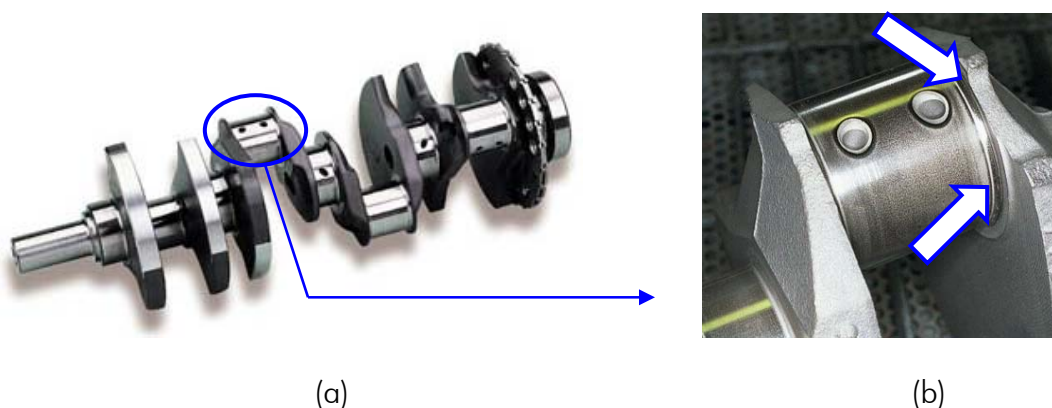
**Figura 2.7** – Sobreposição das tensões residuais com as tensões do esforço cíclico. a) distribuição de tensões em um eixo sob flexão; b) perfil característico das tensões residuais inseridas na peça; c) aspecto resultante da sobreposição de tensões [6]

## 2.2 Roleteamento de Virabrequins

O roleteamento é um processo de conformação mecânica que objetiva introduzir tensões residuais compressivas em camadas próximas à superfície de componentes mecânicos através de roletes. Com isso, tem-se um aumento da resistência mecânica em função do estado de encruamento resultante. Através do processo de roleteamento é possível reduzir consideravelmente a nucleação e a propagação de trincas de fadiga, oriundas de solicitações alternadas.

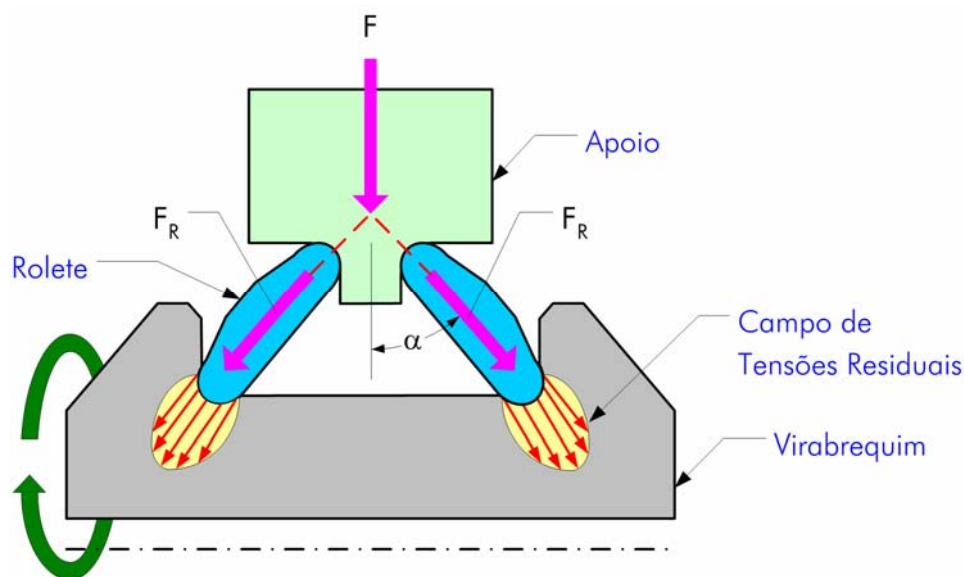
### 2.2.1 Características do Processo de Roleteamento

A **Figura 2.8(a)** ilustra um virabrequim com as típicas variações geométricas. Observa-se que estas variações geométricas são em sua maioria bruscas, onde raios de concordância (*fillet radius*) caracterizam o efeito de concentração de tensão, tanto nas junções dos mancais como também dos munhões, **Figura 2.8(b)**. Nestas regiões as tensões decorrentes das solicitações se concentram, resultando em uma maior susceptibilidade à nucleação e propagação de trincas. Com o objetivo de aumentar a resistência do material nestas regiões e reduzir a influência da concentração de tensões nas regiões do raio de concordância dos mancais e munhões do virabrequim, realiza-se a operação de roleteamento profundo. A deformação plástica é efetuada por meio de roletes (ferramentas), que rolam sobre a superfície do raio de concordância sob um determinado nível de força e dotados de certa velocidade.



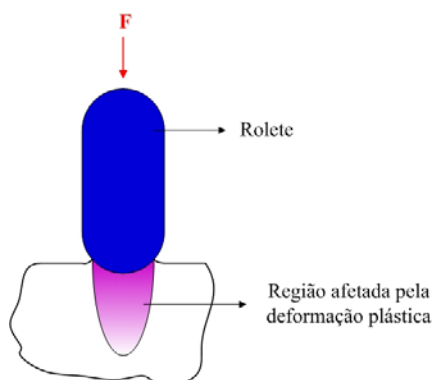
**Figura 2.8** – (a) Exemplo de um virabrequim; (b) Região onde o roleteamento é executado [7]

Em consequência da aplicação da força de compressão sobre o raio, tem-se a formação de um campo de tensões residuais compressivas em camadas próximas à superfície, **Figura 2.9**. Devido à deformação a frio dos grãos da micro-estrutura do material, nesta região ocorre o aumento da dureza e da resistência mecânica. Os efeitos do encruamento promovem o aumento da vida em fadiga do virabrequim.



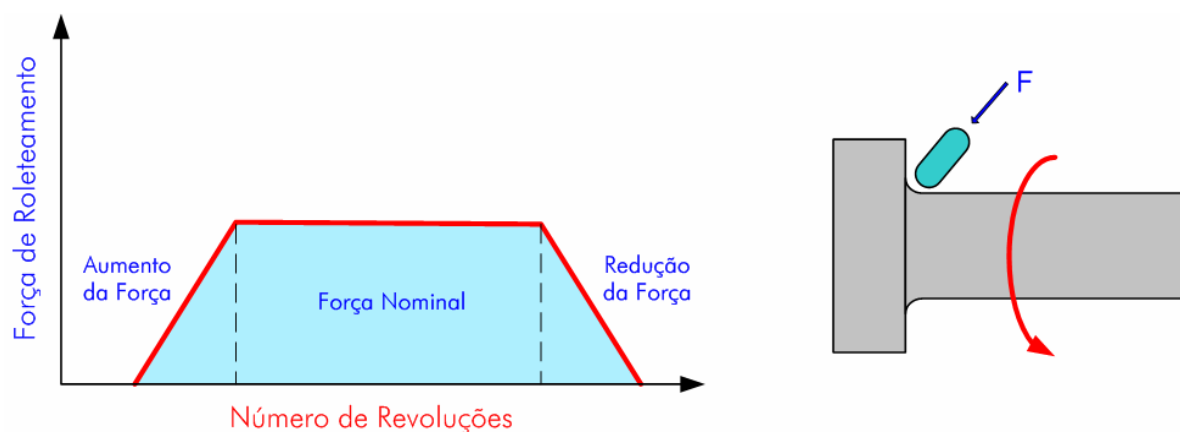
**Figura 2.9** – Modo de aplicação da força no processo de roleteamento de virabrequins

A região afetada pela deformação plástica com a ação da ferramenta é mostrada na **Figura 2.10**. A magnitude da tensão residual compressiva introduzida pode atingir valores até 50% acima do limite de resistência do material [4].



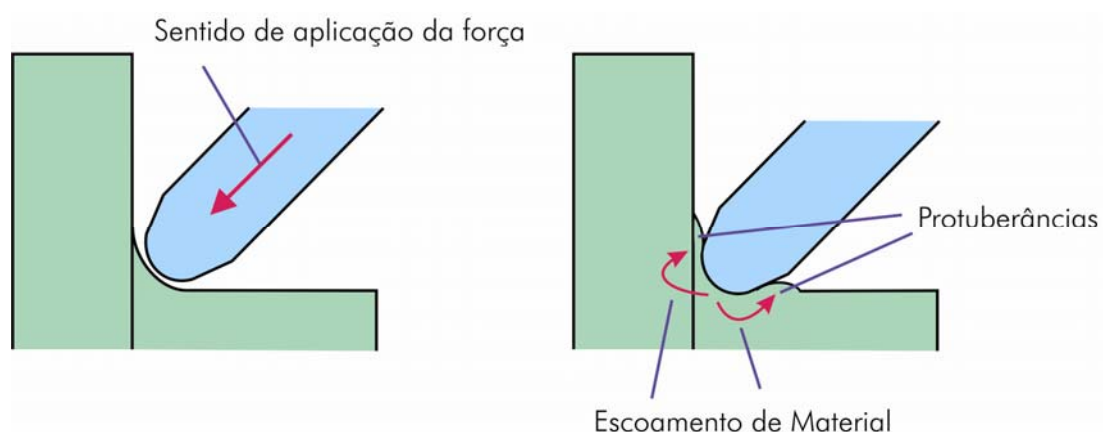
**Figura 2.10** – Região afetada pela deformação plástica induzida pelo rolete

O roleteamento apresenta variações que dependem do material e da geometria do virabrequim. A **Figura 2.11** descreve o processo de roleteamento e o modo de aplicação da força.



**Figura 2.11** – Cinemática do processo de roleteamento de virabrequins [8]

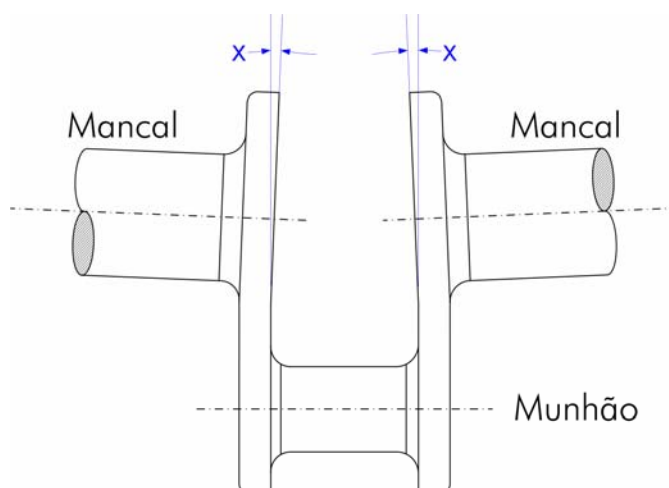
No início da operação a força de roleteamento tem seu valor elevado gradualmente até um valor nominal em um dado intervalo de tempo ou número de revoluções. Após atingir este nível mantém-se a força neste valor nominal durante um número pré-estabelecido de rotações do virabrequim, e no final da operação a força é reduzida gradualmente. Os gradientes de aumento e diminuição da força devem ser otimizados com o objetivo de minimizar o tempo de roleteamento sem introduzir defeitos no componente devido a elevados gradientes de força. A **Figura 2.12** ilustra as deformações plásticas ocasionadas pelo processo de roleteamento na região do raio de concordância de um virabrequim.



**Figura 2.12** – Deformação local ocasionada pela ferramenta de roleteamento [8]

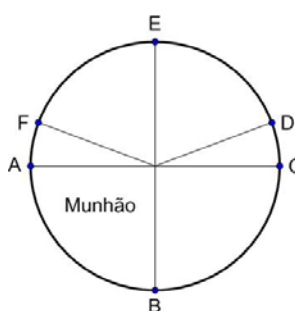
Devido às características geométricas irregulares do virabrequim o roleteamento sobre um determinado munhão tem como efeito uma ligeira deformação das faces, como ilustrado na **Figura 2.13**. O efeito global desta deformação sobre o virabrequim é ocasionar o desalinhamento dos mancais e o aumento do comprimento do virabrequim. Estudos conduzidos por Wright *et. al.* [9] mostram aumentos do comprimento do virabrequim da ordem de 0,0127mm para cada raio submetido ao roleteamento, em função do nível de tensões residuais introduzidas. A intensidade das tensões residuais faz com que o virabrequim mantenha-se em um estado de deformação permanente, não retornando à condição inicial após o roleteamento.

A perda do alinhamento dos mancais é mais intensa quando o roleteamento é realizado somente no mancal central ou nos munhões centrais. Através do roleteamento dos raios de concordância adjacentes é possível compensar a perda de coaxialidade dos mancais do virabrequim [9].



**Figura 2.13** – Efeito do roleteamento sobre o alinhamento do virabrequim [9]

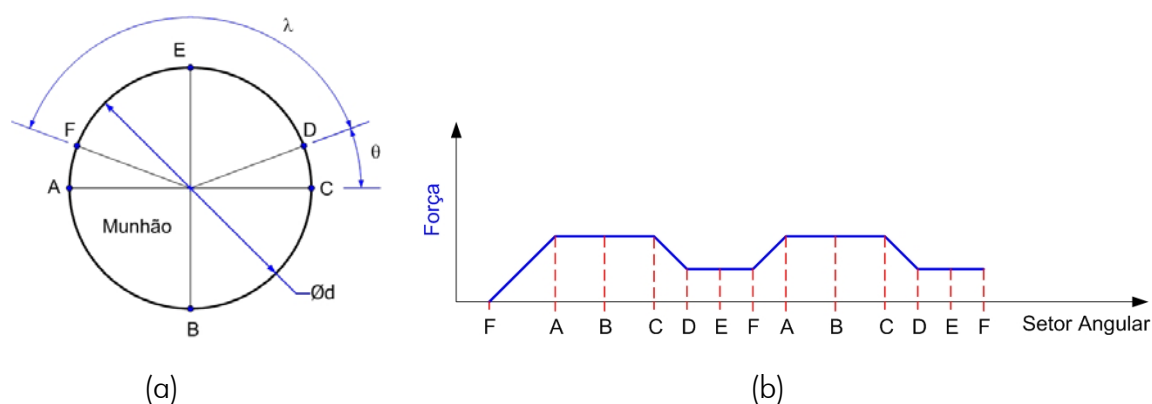
Uma alternativa para realizar a compensação de desalinhamento dos mancais é realizar o chamado Roleteamento Setorial ou roleteamento dependente do ângulo de giro. O roleteamento setorial é executado somente nos munhões do virabrequim, onde diferentes níveis de força são aplicados em função do setor angular. Nesta técnica o munhão é dividido em quatro setores circulares espaçados de um determinado ângulo, onde cada setor possui um comprimento de arco a ser percorrido pelo rolete, como ilustrado na **Figura 2.14**. A força aplicada em cada setor varia de acordo com o tipo e o modelo de virabrequim.



**Figura 2.14** – Subdivisão da seção do munhão do virabrequim para o roleteamento setorial

No roleteamento setorial os roletes percorrem as trajetórias entre os setores angulares definidas pelos pontos A-B-C-D-E-F e com a aplicação de diferentes forças em cada intervalo, como ilustrado na **Figura 2.15**. A deformação do virabrequim não ocorre

de forma simétrica quando da aplicação das forças. Em função disto, o roleteamento setorial pode ser utilizado para corrigir a coaxialidade dos mancais.



**Figura 2.15** – (a) Trajetórias percorridas pelos roletes; (b) Comportamento da força no roleteamento setorial

Caso não seja possível efetuar o ajuste dos mancais em relação ao desalinhamento somente com o roleteamento setorial dos munhões, realiza-se um novo roleteamento em determinados munhões e/ou mancais, em função do resultado da medição de coaxialidade. Este novo roleteamento deve ser conduzido com uma força maior, devido ao estado de tensão residual compressiva obtido anteriormente na região do raio de concordância. O número de vezes que este novo roleteamento pode ser realizado é limitado pela ocorrência de danificação do material tanto da peça quanto das ferramentas e por um aumento excessivo do encruamento do virabrequim.

### 2.2.2 Força de Roleteamento

Através do processo de roleteamento é possível aumentar o limite de resistência à fadiga de componentes trabalhados em uma faixa que pode variar de 100 a 240% [10]. Observa-se um aumento da vida do componente com o aumento da força de roleteamento. Após atingir um valor máximo a vida do componente novamente tende a diminuir, como ilustra a **Figura 2.16**.

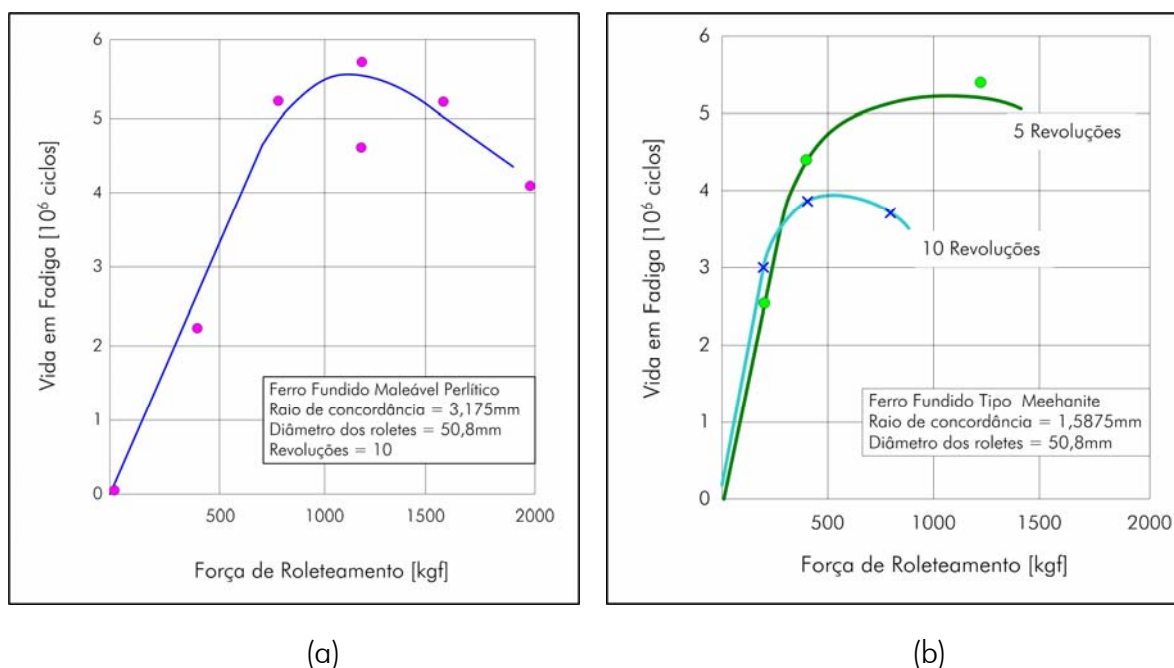


Figura 2.16 – Influência da força de roleteamento sobre a vida em fadiga [10]

A diminuição da vida do componente após o máximo da força de roleteamento é atribuído à presença de elevadas tensões de tração sub-superficiais na peça e a danificação da estrutura em camadas próximas à superfície do componente em função da aplicação de forças extremamente elevadas [10].

A seleção da força de roleteamento depende dos seguintes fatores:

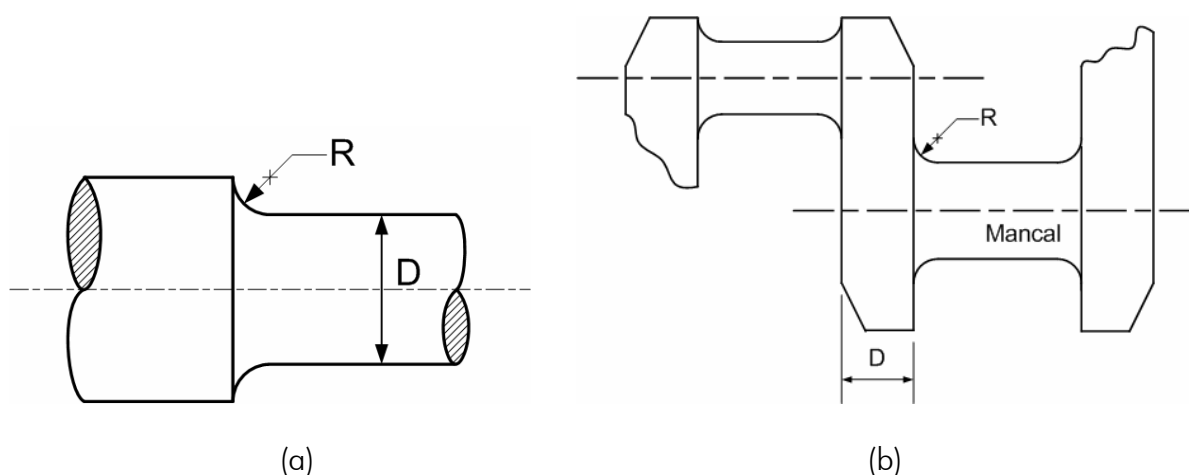
- Material do virabrequim;
- Geometria do raio de concordância;
- Dimensões do virabrequim;
- Aumento da vida do componente esperado.

Para componentes de ferro fundido, a força de roleteamento é dada pela equação empírica (2.3) [10].



$$F_R = K \cdot \sigma_R^{1/2} \cdot R^{3/4} \cdot D^{8R} \quad 2.3$$

onde:  $F_R^1$  é a força de roleteamento em cada rolete (tf),  $K$  é uma constante dependente do material e do objetivo a ser atingido para o resultado de trabalho,  $\sigma_R^1$  é o limite de resistência do material (tf/in<sup>2</sup>),  $R$  é o valor do raio de concordância (in), e  $D^1$  é um valor que está relacionado às dimensões do componente a ser trabalhado (in). O valor da constante  $K$  é dependente da força de roleteamento, variando de 1 até 1,6 (força de roleteamento mais elevadas). Na maioria das aplicações práticas assume-se o valor médio  $K = 1,3$ . O valor mínimo para a constante  $K$  é 1. Com o valor mínimo, menores distorções da região do raio de concordância são obtidas. Para barras cilíndricas com variações na seção transversal, o valor a ser utilizado para a variável  $D$  é o menor diâmetro do eixo ilustrado na **Figura 2.17(a)**. No caso de virabrequins, recomenda-se utilizar a menor espessura das faces que fazem a ligação dos mancais com os munhões, com no máximo 25,4mm (1in), como ilustra a **Figura 2.17(b)**.



**Figura 2.17** – Parâmetros de seleção para a constante  $D$  da equação (2.3). (a) Roleteamento em eixos cilíndricos. (b) Roleteamento de virabrequim [10]

<sup>1</sup> As unidades devem ser em tonelada-força e polegada, pois se trata de uma equação empírica.

Para componentes de aço são estabelecidos limites de aplicação da força de roleteamento [10]. Os limites superior e inferior são dados pelas equações empíricas (2.4) e (2.5)

$$F_{RS} = 0,38 \cdot \sigma_R \cdot R^{5/3} \cdot \left( \frac{d}{R} + 1 \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

$$F_{RI} = 0,27 \cdot \sigma_R \cdot R^{5/3} \cdot \left( \frac{d}{R} + 1 \right)^{1/4} \quad (2.5)$$

onde:  $F_{RS}^2$  e  $F_{RI}^2$  são os limites superior e inferior da força de roleteamento em cada rolete (tf), respectivamente,  $d^2$  é o diâmetro dos roletes-ferramenta (in). O uso do limite superior resulta em uma maior resistência à fadiga do virabrequim, porém é acompanhado de um nível elevado de distorção do componente. O emprego destas equações é recomendado para virabrequins com dimensões típicas às utilizadas em automóveis. Quando o roleteamento for executado em componentes de dimensões maiores, é preciso realizar ensaios específicos para verificar a influência da geometria do componente sobre o resultado de trabalho.

O gradiente de aplicação da força de roleteamento deve ser mantido numa faixa definida para evitar a danificação dos roletes. Este procedimento evita a formação de marcas nos rolos transferidas para a região do raio. Embora estas marcas não tenham efeito apreciável sobre a resistência do componente, elas poderão ocasionar o travamento dos roletes prejudicando seu rolamento sobre a superfície do raio e também a redução da vida do rolete [9, 10, 11].

Após a operação de roleteamento observa-se uma redução da rugosidade da superfície. Friemuth *et. al.* [12] obteve reduções da ordem de 15% na rugosidade média  $R_a$  da superfície de componentes de magnésio, usinados e submetidos ao roleteamento. Para forças de roleteamento elevadas ocorre deterioração da superfície da peça e o resultado é um aumento da rugosidade  $R_a$ . Friemuth *et. al.* [12] também observou que

---

<sup>2</sup> As unidades devem ser em tonelada-força e polegada, pois se trata de uma equação empírica.

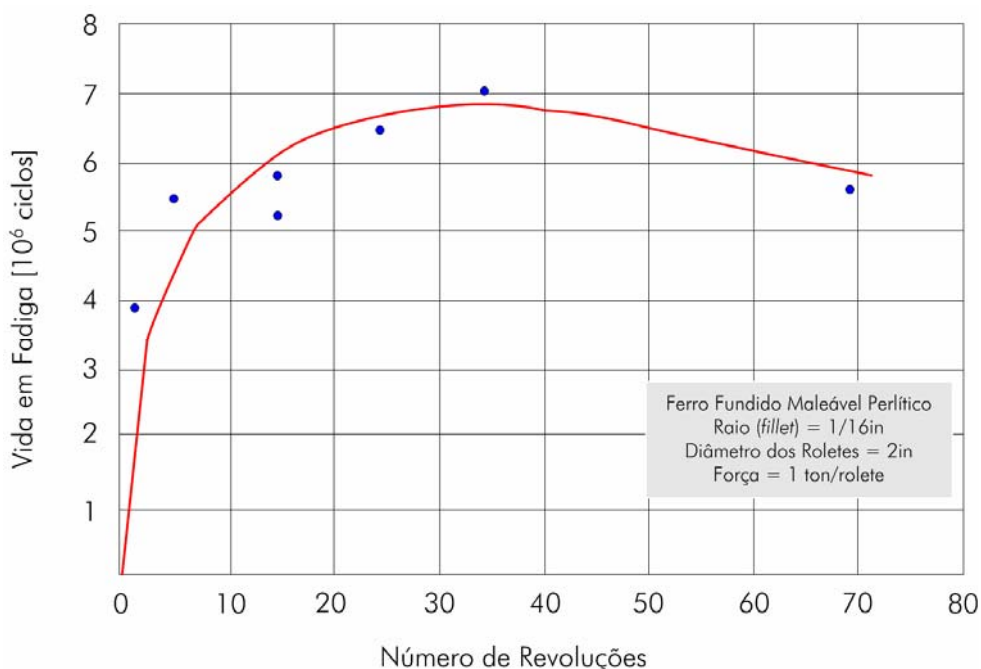
para forças muito elevadas há a formação de tensões residuais de tração na superfície da peça, o que não é desejável pois reduz a resistência à fadiga do componente.

### 2.2.3 Influência do Número de Rotações

No processo de roleteamento distinguem-se os ciclos de rotações inteiras de aumento da força, força constante e de redução da força, **Figura 2.11**.

O número de rotações da peça em cada um dos ciclos é função do material e da geometria do componente [9]. A otimização dos ciclos é realizada experimentalmente. Como exemplo pode-se citar o roleteamento 6 – 10 – 6, ou seja, seis rotações até atingir a força máxima, dez rotações em força máxima constante e mais seis rotações no sentido de redução da força até o valor mínimo.

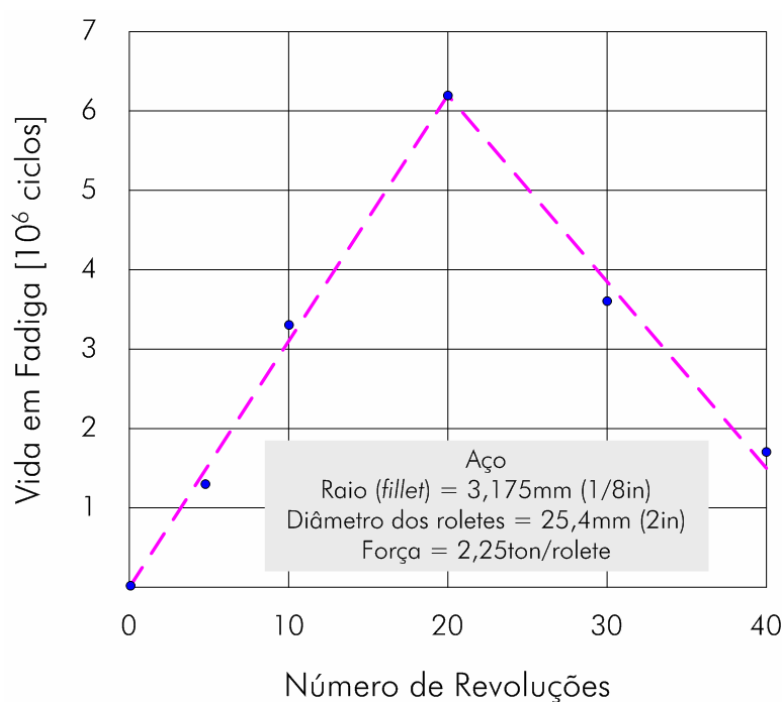
O número de revoluções utilizado é menos crítico que a influência da força de roleteamento aplicada nos roletes [9]. A primeira revolução da ferramenta em torno do componente já apresenta uma influência significativa sobre o aumento da resistência à fadiga do componente, como mostrado na **Figura 2.18**.



**Figura 2.18** – Influência do número de rotações sobre a vida em fadiga de um componente de ferro fundido no processo de roleteamento [9]

A vida do componente aumenta com o aumento do número de rotações da peça até atingir um máximo com aproximadamente 35 revoluções da operação de roleteamento. A partir daí, observa-se uma diminuição da vida em função de defeitos sub-superficiais introduzidos pelo próprio processo de roleteamento.

A **Figura 2.19** mostra o efeito do número de rotações de roleteamento sobre um componente de aço, ilustrando um máximo bem definido para a vida do componente alcançado com 20 revoluções. Para a maioria dos materiais fundidos, em torno de 10 revoluções são suficientes para melhorar significativamente a resistência à fadiga [9].



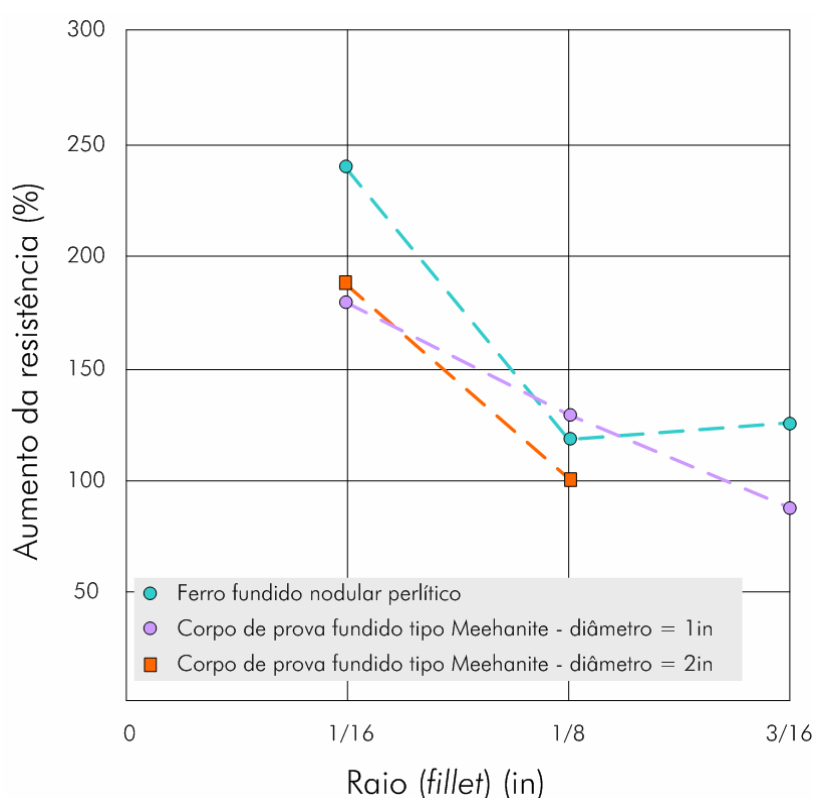
**Figura 2.19** – Efeito do número de rotações sobre a vida em fadiga de um componente de aço no processo de roleteamento [9]

#### 2.2.4 Raio de Concordância

As características macro e micro-geométricas do raio de concordância do virabrequim merecem atenção quando da especificação do projeto e fabricação. A dimensão do raio de concordância influencia a resistência à fadiga do virabrequim. De acordo com Wright *et. al.* [9], melhores resultados de vida em fadiga de componentes

submetidos ao processo de roleteamento são obtidos com o uso de raios de concordância de dimensões pequenas, como ilustra a **Figura 2.20**.

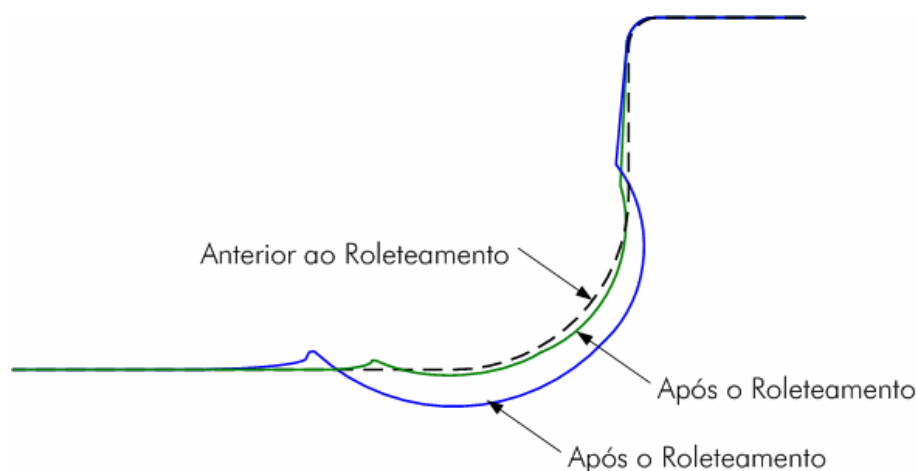
Testes de fadiga sob flexão alternada realizados por Wright *et. al.* [10] em corpos de prova mostraram que virabrequins com raio de concordância de 1,58mm (1/16in) submetido ao roleteamento apresentaram níveis de resistência à fadiga duas vezes maior em comparação com virabrequins com raio de concordância de 2,38mm (3/32in). Segundo Wright *et. al.* [10], antes da operação de roleteamento a resistência do componente era significativamente influenciada pela utilização de um raio de concordância de tamanho reduzido. Após o processo de roleteamento, o raio de concordância passou a não ter grande influência sobre a resistência do material, no sentido de redução da vida do componente.



**Figura 2.20** – Efeito do tamanho do raio de concordância sobre a resistência à fadiga de acordo com Wright *et. al.* [10]

Segundo Wright *et. al.* [10] a rugosidade da superfície do raio de concordância anterior à operação de roleteamento não apresenta influência significativa sobre a vida em fadiga do componente, de modo que operações de torneamento são suficientes para conferir uma superfície com características adequadas ao processo de roleteamento.

Durante a operação de roleteamento ocorre um deslocamento lateral de material da região do raio de concordância, função das elevadas forças envolvidas no processo. Esse deslocamento de material provoca o surgimento de pequenas elevações laterais ao rolete, como mostra a **Figura 2.21** [9, 10]. Estas elevações são indesejáveis. Na maioria das aplicações esse deslocamento de material é corrigido por outros processos de fabricação, como por retificação. Estas irregularidades poderão acarretar em problemas de montagem do componente, especialmente quando a superfície adjacente ao raio de concordância for projetada para suportar carga ou atuar como superfície de escorregamento. O material deslocado poderá estender-se por uma distância significativa ao longo da superfície cilíndrica adjacente ao raio de concordância, de forma que quase sempre é necessário efetuar sua remoção.

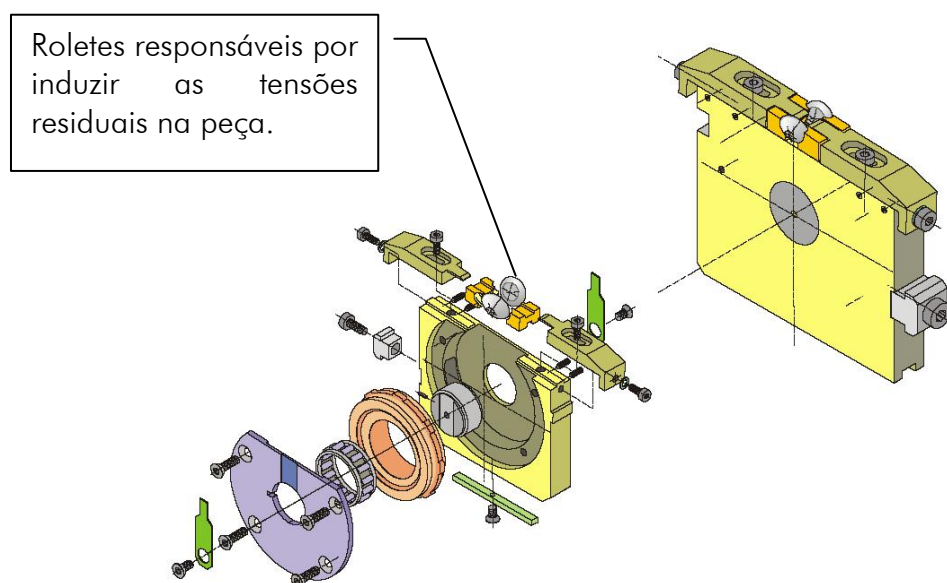


**Figura 2.21** – Comportamento do raio de concordância no processo de roleteamento [10]

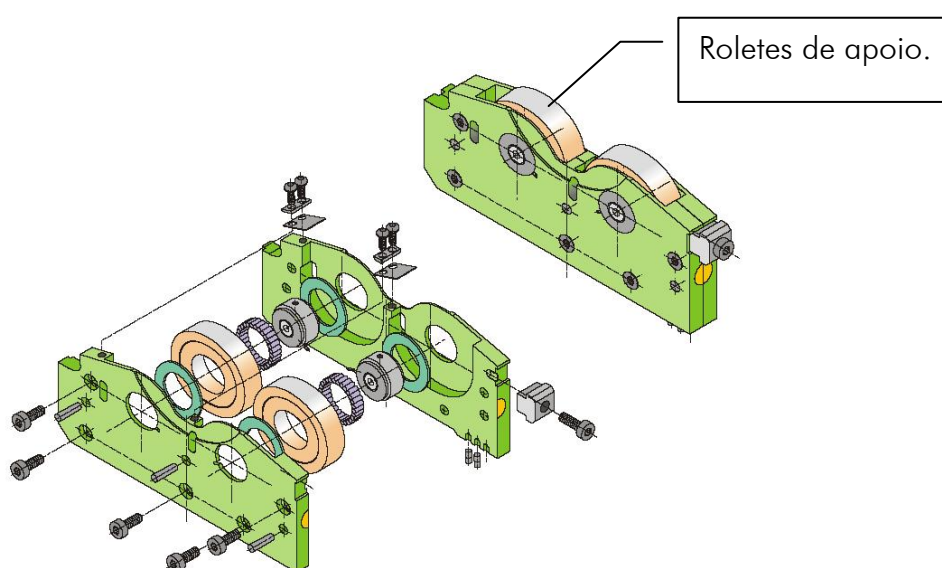
### 2.2.5 Ferramentas de Roleteamento

As ferramentas utilizadas no processo de roleteamento possuem a forma de roletes. Estas ferramentas devem ser capazes de “rolar” sobre a superfície do

componente, no caso virabrequim, sobre a superfície do raio de concordância. Como o processo de roleteamento não se restringe somente a virabrequins, é possível encontrar diferentes tipos e concepções de roletes, havendo algumas aplicações que utilizam esferas como ferramentas. O que diferencia as ferramentas são variações na geometria aliadas às diferentes formas de aplicação da força em função dos requisitos do componente a ser trabalhado. As concepções dos sistemas de ferramentas para roleteamento de virabrequins estão ilustradas na **Figura 2.22** e **Figura 2.23**.



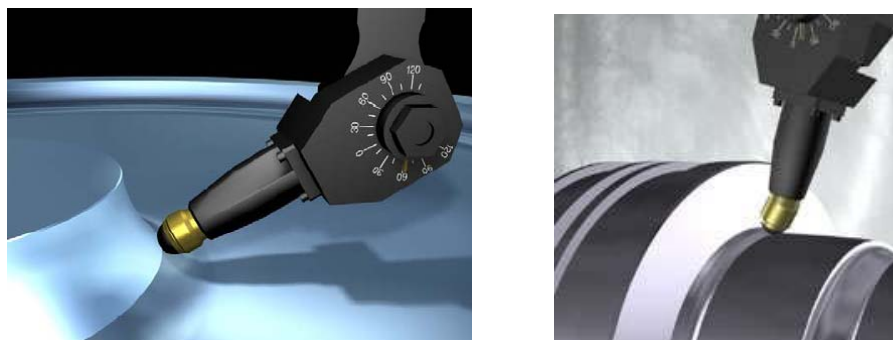
**Figura 2.22** – Cabeçote de ferramentas para roleteamento de virabrequins [11]



**Figura 2.23** – Cabeçote de ferramentas para apoio dos mancais durante a operação [11]

### Ferramentas com Acionamento Mecânico

Nesse tipo de concepção, a ferramenta, geralmente uma esfera, é montada em um mancal de escorregamento e a força aplicada na peça através da ferramenta é realizada por meio de molas. A intensidade da força é determinada pela variação da deformação da mola e o controle da força é realizado por medições diferenciais de deslocamento, utilizando-se para isso um relógio comparador ou um sensor. A vantagem desse tipo de concepção é o baixo custo da ferramenta. Como desvantagem tem-se que a flexibilidade do sistema fica comprometida pelos máximos deslocamentos das molas. A **Figura 2.24** ilustra o exemplo de ferramenta de roleteamento de esferas com acionamento mecânico.



**Figura 2.24** – Ferramentas de roleteamento de esferas e acionamento mecânico [8]

### Ferramenta com Acionamento Hidráulico

O funcionamento de uma ferramenta com acionamento hidráulico é análogo ao acionamento mecânico, com a diferença de que a força de trabalho aplicada é obtida através da pressão de um fluido. O sistema de acionamento hidráulico pode fazer parte da própria máquina ou, na maioria dos casos, pode ser um equipamento a parte com a única função de fornecer as pressões desejadas para a ferramenta. A força aplicada na ferramenta pode ser monitorada por manômetros ou transdutores. O controle da pressão do fluido de trabalho irá determinar a condição de operação. A **Figura 2.25** ilustra um conjunto de ferramentas com acionamento hidráulico.





Figura 2.25 – Ferramentas de roleteamento acionadas hidráulicamente [13]

### Geometria das Ferramentas de Roleteamento

A geometria dos roletes deve ser adequada à operação de roleteamento desejada. O raio do rolete deverá ter um valor menor do que o raio de concordância do virabrequim, como ilustra a **Figura 2.26**. Isto é necessário para que não ocorra o travamento dos roletes e sua conseqüente quebra. Para uma penetração adequada da ferramenta o rolete deve ter faces paralelas e o raio de trabalho concorde com as duas faces [10]. O valor exato para o raio do rolete deve estar compreendido entre as tolerâncias de usinagem do raio de concordância.

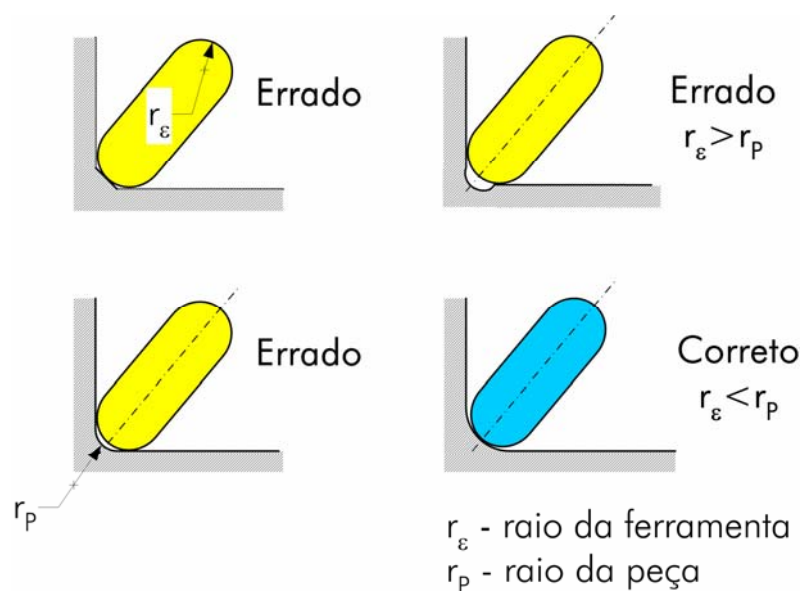
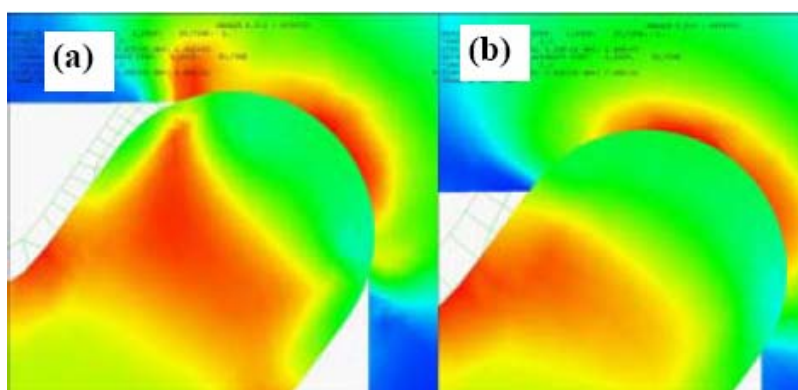


Figura 2.26 – Condições de utilização das ferramentas de roleteamento

Segundo Wright *et. al.* [10] o raio  $r_e$  do rolete deve situar-se na faixa de tolerância do raio de concordância do componente, sendo o mesmo em torno de 0,1mm menor. O raio menor da ferramenta é necessário para que a deformação plástica inicie a partir da região central do raio de concordância do componente para a periferia, e não o oposto. No caso das duas ondas de deformação plástica se concentrem na região central do raio de concordância, pode ocorrer uma superposição de material, o que representa uma trinca nucleada em toda circunferência do componente. Além disto, os roletes tendem a travar quando o raio de trabalho do mesmo é maior que o raio de concordância da amostra, **Figura 2.26**, e com isso, os roletes aquecem devido ao atrito elevado, culminando sua ruptura.

Em função das elevadas forças de roleteamento, é de extrema importância avaliar os efeitos destas sobre as ferramentas. No roleteamento de virabrequins deve-se dar atenção especial aos roletes utilizados nos munhões dos virabrequins, os quais operam sob aplicação alternada da força de roleteamento, estando assim mais submetidos ao processo de fadiga. A qualidade da topografia dos roletes que operam nestas regiões também merece atenção especial.

Massué *et. al.* [14], conduziu estudos sobre a influência da geometria do raio de concordância sobre a vida da ferramenta de roleteamento, **Figura 2.27**. Seus resultados mostram que uma forma correta do raio de concordância do componente pode reduzir a magnitude das tensões originadas na ferramenta e, conseqüentemente, aumentar a vida das ferramentas no roleteamento.



**Figura 2.27** – Influência da geometria do raio de concordância do virabrequim sobre a vida da ferramenta. a) Distribuição de tensões na geometria antiga; b) Geometria otimizada [14]

De acordo com Massué *et. al.* [14], os custos relacionado às ferramentas de roleteamento caracterizam uma parcela de elevado valor sobre o custo da operação, podendo atingir a cifra de até 70% do custo total.

### **Lubrificação das Ferramentas de Roleteamento**

Durante o processo de roleteamento é importante que haja atuação de fluido lubrificante (óleo) para auxiliar a lubrificação dos roletes na superfície do raio de concordância e promover a redução do atrito, com isso a resistência à movimentação dos roletes sobre a superfície é reduzida.

### 3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Realização de Ensaio Práticos de Roleamento

Os ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar a influência da força de roleteamento e das características do material utilizado sobre as seguintes variáveis do virabrequim:

- Comprimento;
- Coaxialidade;
- Raio de concordância dos mancais e munhões;
- Profundidade de penetração da ferramenta na peça.

##### 3.1.1 Características dos Corpos de Prova Utilizados

###### Características mecânicas

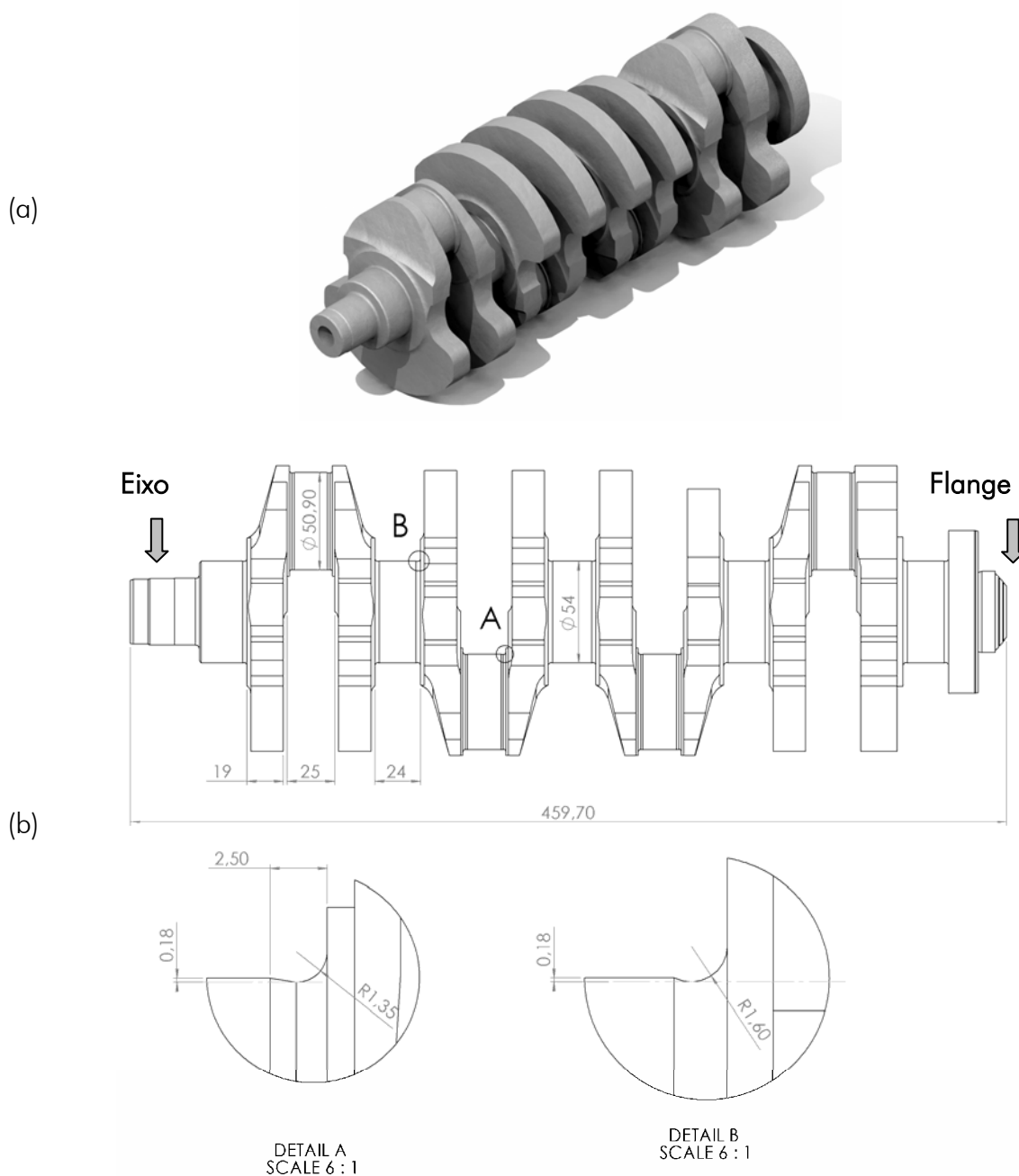
Os testes foram conduzidos em 16 virabrequins de ferro-fundido nodular, divididos em quatro grupos de acordo com diferentes valores de resistência, conforme ilustra a Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Características mecânicas dos virabrequins utilizados nos testes de roleteamento

Virabrequim	Limite de Escoamento	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson
11 – 12 – 13 – 14	1450MPa	110000MPa	0,28
21 – 22 – 23 – 24	1250MPa		
31 – 32 – 33 – 34	1100MPa		
41 – 42 – 43 – 44	950MPa		

### Dimensões dos corpos de prova

Os virabrequins utilizados nos ensaios possuem a geometria e as dimensões ilustradas na **Figura 3.1**. As designações “Eixo” e “Flange” representam as referências adotadas para a execução dos ensaios práticos em relação ao posicionamento das ferramentas.



**Figura 3.1** – Geometria e dimensões dos virabrequins utilizados nos testes

### 3.1.2 Características das Ferramentas de Roleteamento

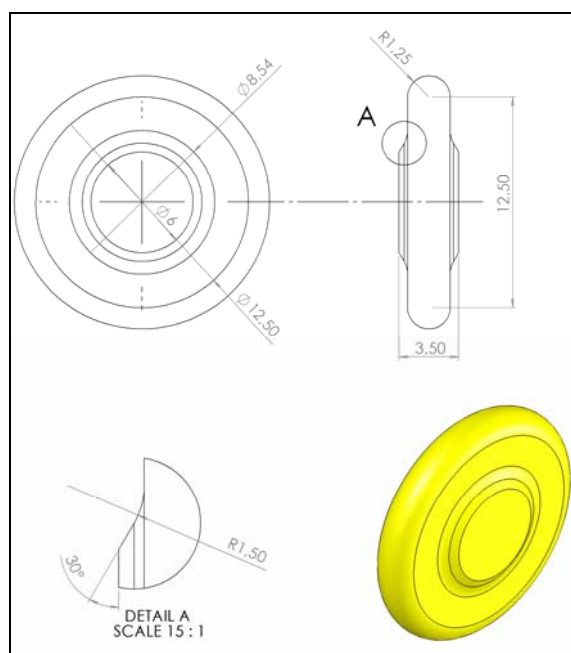
Para a realização dos ensaios de roleteamento foi utilizado um sistema de ferramentas composto de um par de roletes responsáveis por imprimir as tensões residuais compressivas, ilustrado na **Figura 3.2**, e outro sistema com um par de roletes de apoio para os mancais e munhões do virabrequim.

#### Características mecânicas dos roletes

**Tabela 3.2** – Características mecânicas das ferramentas de roleteamento

Limite de Escoamento	Módulo de Elasticidade	Coefficiente de Poisson	Dureza
1600MPa	210000MPa	0,3	54HRc

#### Dimensões dos roletes



**Figura 3.2** – Ilustração das ferramentas (roletes) utilizadas nos ensaios de roleteamento

Os roletes utilizados como apoio, em decorrência da grande superfície de contato com o virabrequim, não influenciam o resultado de trabalho, não sendo detalhada a sua geometria e características mecânicas.

### 3.1.3 Variáveis de Entrada

#### Força de roleteamento

Os ensaios foram divididos em quatro amostras, dispondo-se de quatro virabrequins em cada uma. Os mancais e munhões de cada grupo são submetidos ao roleteamento em condições distintas, como ilustra a **Tabela 3.3**.

**Tabela 3.3** – Metodologia de execução dos ensaios de roleteamento

Amostra	Virabrequim	Força de Roleteamento [N]		
		Mancais 2–4–5	Mancal 3	Munhões 1–2–3–4
1	11 – 21 – 31 – 41	20000	12000	20000
2	12 – 22 – 32 – 42	20000	16000	20000
3	13 – 23 – 33 – 43	20000	20000	24000
4	14 – 24 – 34 – 44	20000	24000	24000

Com isto estão disponíveis quatro amostras nas quais é possível analisar os efeitos da força de roleteamento e das características do material sobre o resultado de trabalho. Um segundo método para análise dos dados é utilizar virabrequins de mesmo material e avaliar a repetibilidade dos resultados nos mancais 2, 4 e 5, como mostra a **Tabela 3.4**.

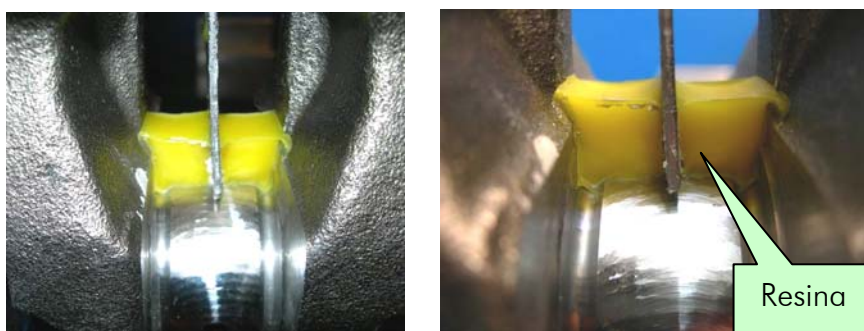
**Tabela 3.4** – Proposta 2 de análise dos dados do processo de roleteamento de virabrequins

Amostra	Virabrequim	Força de Roleteamento [N]
		Mancais 2–4–5
1	11 – 12 – 13 – 14	20000
2	21 – 22 – 23 – 24	20000
3	31 – 32 – 33 – 34	20000
4	41 – 42 – 43 – 44	20000

### 3.1.4 Técnicas de medição

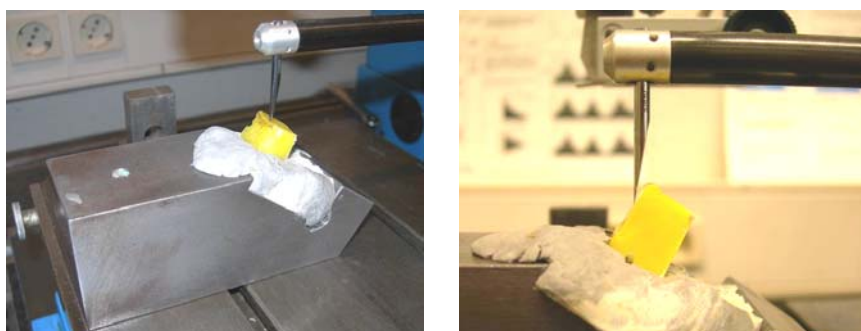
Todas as variáveis foram avaliadas antes e após os testes de roleteamento. A medição da coaxialidade dos virabrequins foi executada somente nos mancais, devido ao interesse específico para a montagem do virabrequim no bloco do motor.

As características do raio de concordância foram determinadas com o auxílio de uma técnica de moldagem da região do mancal e do munhão do virabrequim por meio de uma resina plástica, reproduzindo-se um negativo do raio de concordância e de uma porção adjacente da superfície do mancal e/ou munhão. Esta resina não apresenta contração volumétrica significativa durante a cura e apresenta uma elevada resistência mecânica, representando fielmente o negativo da região moldada, **Figura 3.3**.



**Figura 3.3** – Execução da técnica de reprodução do raio de concordância dos virabrequins

Este molde é então posicionado em um dispositivo e efetuada a medição do perfil com o auxílio de um perfilômetro, **Figura 3.4**.



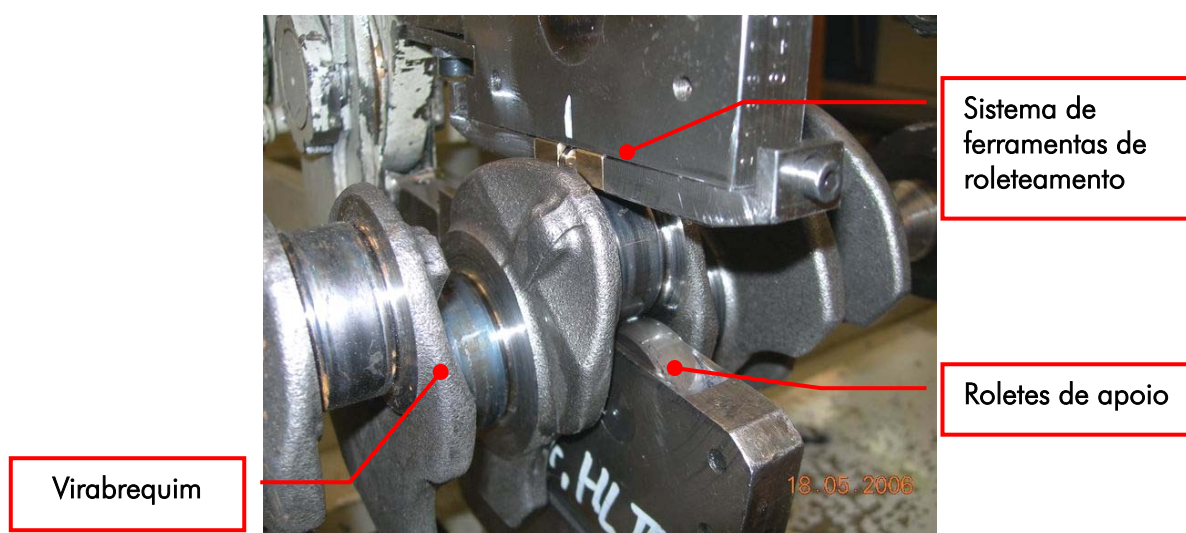
**Figura 3.4** – Medição do raio de concordância com o perfilômetro



### 3.1.5 Equipamentos e Dispositivos

#### Bancada de Testes

Os ensaios de roleteamento foram realizados em uma bancada de testes no Departamento de Desenvolvimento da Empresa Hegenscheidt-MFD. A bancada é constituída de um cabeçote que permite a fixação e rotação do virabrequim. Um contraponto evita a deflexão excessiva do virabrequim durante a realização dos ensaios. Através de um dispositivo hidráulico, os roletes de apoio e de aplicação da força de roleteamento são aproximados e pressionados contra as superfícies dos raios de concordância do virabrequim, **Figura 3.5**.



**Figura 3.5** – Execução dos testes na bancada de ensaios

#### Equipamentos de medição

A medição das dimensões de interesse do virabrequim são realizadas em um dispositivo de fixação vertical (para garantir uma menor deflexão) com um apalpador digital, **Figura 3.6**. As características do equipamento estão descritas na **Figura A1**, do anexo A.



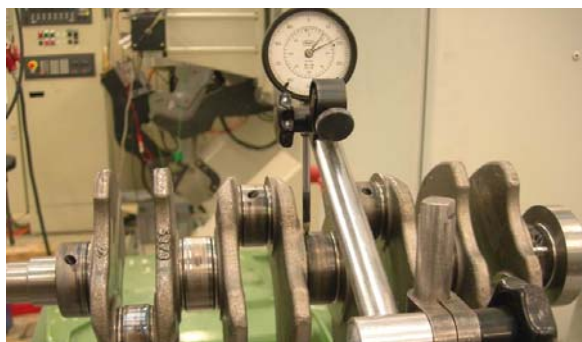
**Figura 3.6** – Equipamento de medição digital utilizado para determinar o comprimento do virabrequim e o afastamento entre as faces dos munhões

O raio de concordância do virabrequim e a profundidade de penetração da ferramenta na peça foram determinados, nas amostras moldadas, com o auxílio de um perfilômetro, **Figura 3.7**, empregando um software para inverter os dados obtidos para o perfil positivo. As características do perfilômetro utilizado estão descritas na **Figura A2** do anexo A.



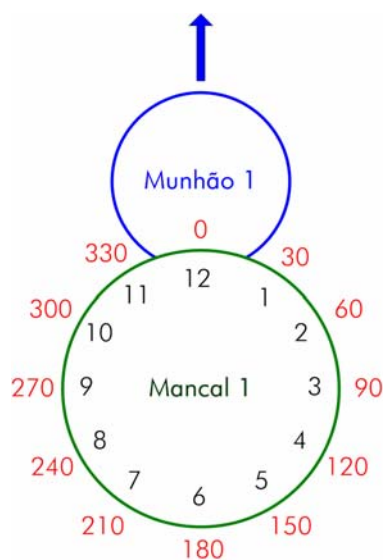
**Figura 3.7** – Perfilômetro para medição do raio de concordância e profundidade de penetração dos roletes de trabalho

Para a medição da coaxialidade do virabrequim, este é montado entre pontas fixas numa bancada, e os desvios de coaxialidade são verificados com o auxílio de um relógio comparador, **Figura 3.8**. Este procedimento é executado antes e após o processo de roleteamento.



**Figura 3.8** – Montagem do relógio comparador para avaliação da coaxialidade do virabrequim

A medição da coaxialidade é realizada com a determinação dos desvios a cada giro de  $360^\circ$  do virabrequim. Posiciona-se o relógio comparador no mancal 1, com o munhão 1 apontando para  $0^\circ$ , ou a posição 12 de acordo com a **Figura 3.9**, e gira-se o virabrequim  $360^\circ$ . Os valores máximos dos desvios de coaxialidade de cada mancal são determinados e correlacionados com o respectivo ângulo de giro, a cada  $30^\circ$ .



**Figura 3.9** – Procedimento de medição da coaxialidade do virabrequim

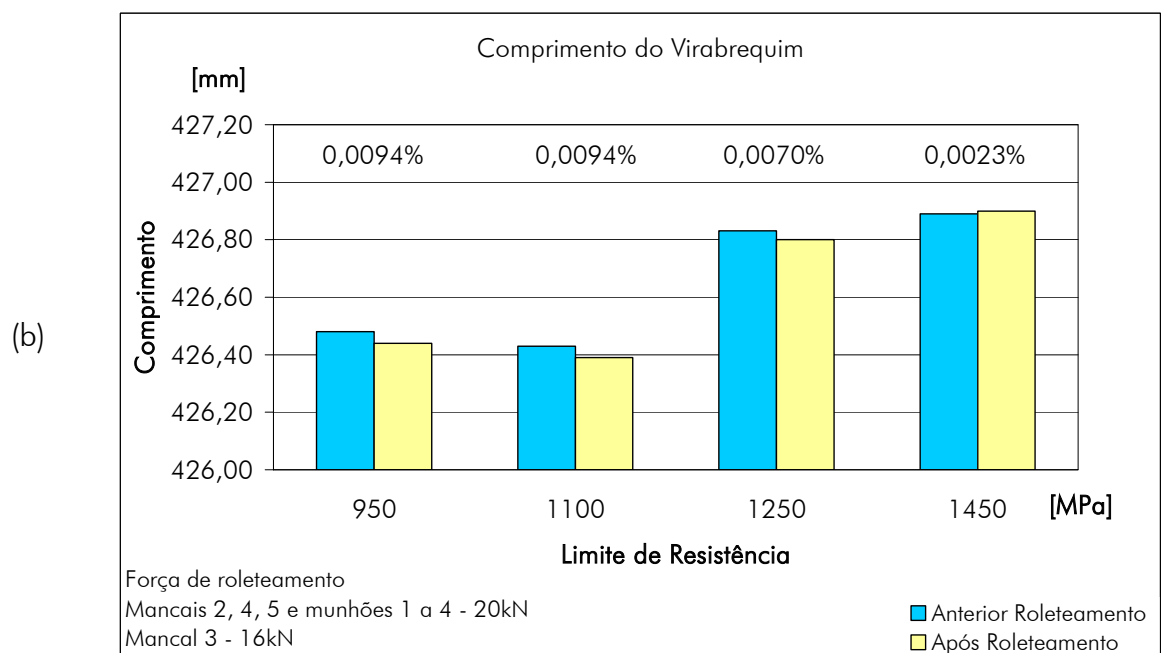
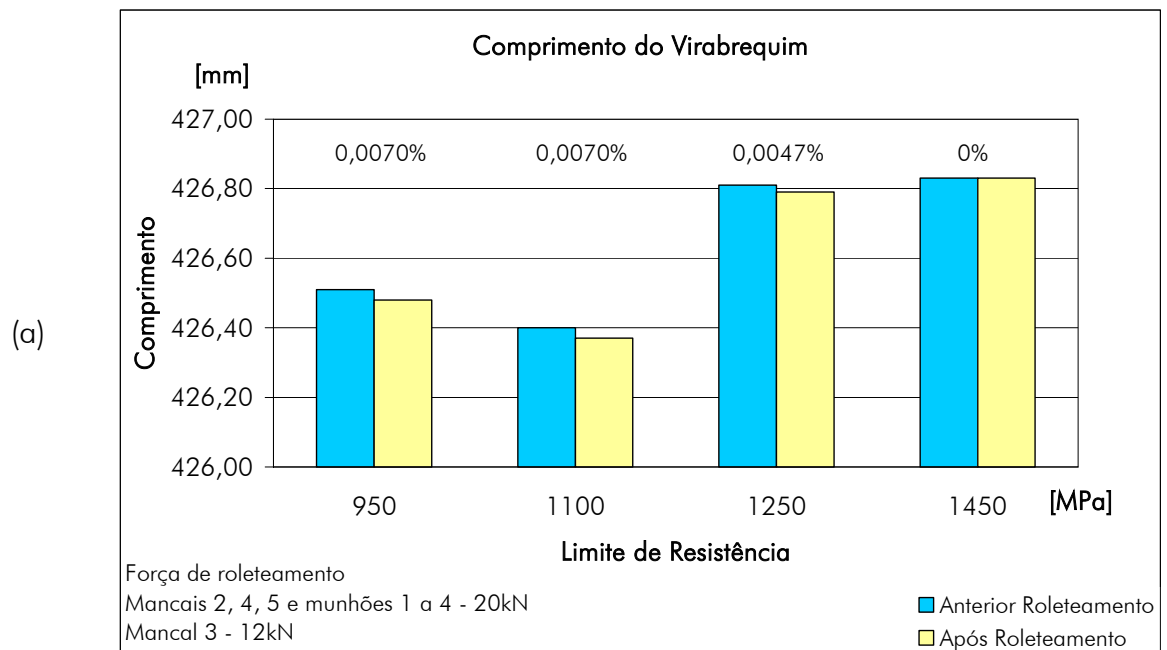
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

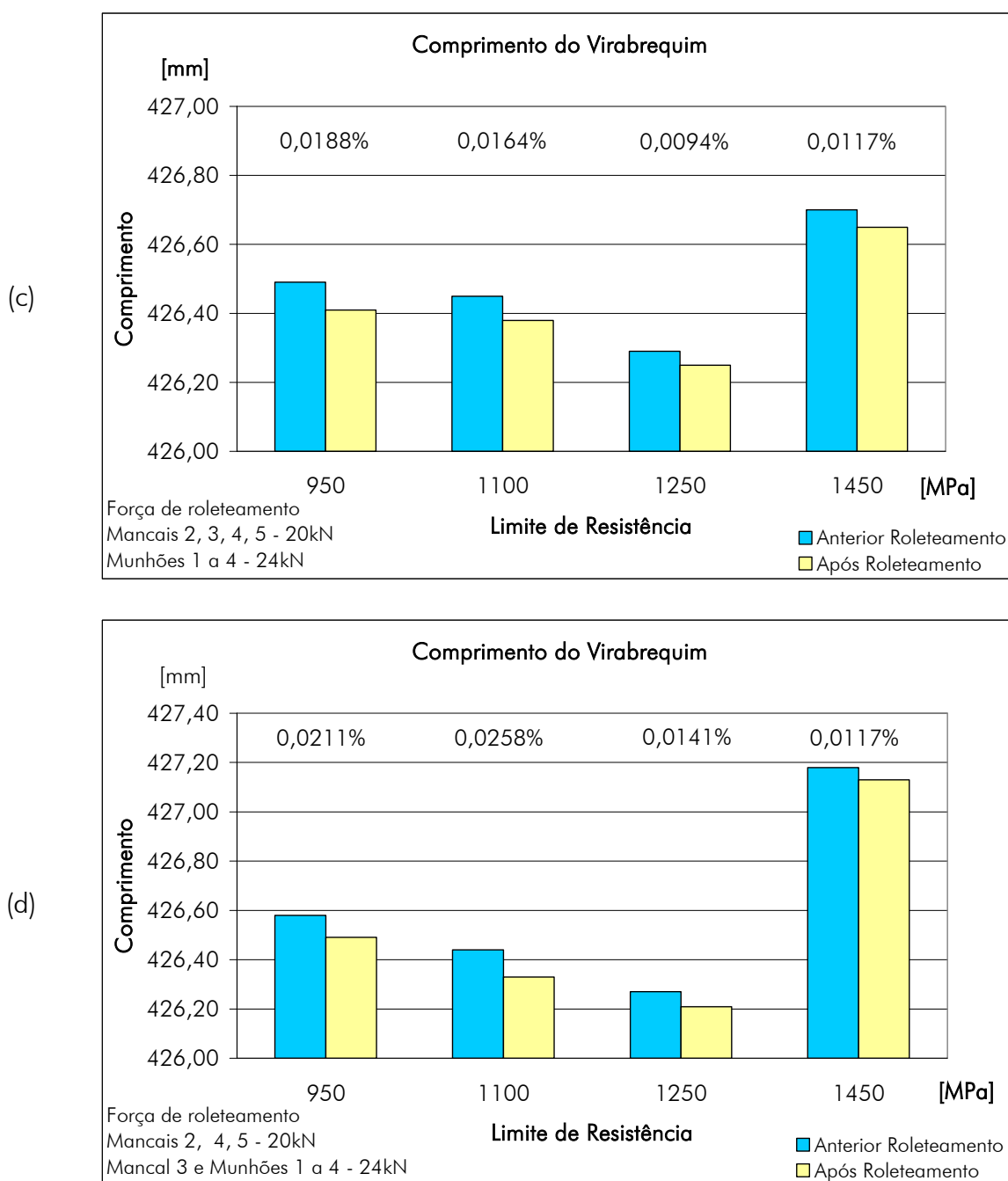
Uma das grandes dificuldades de estudo no processo é prever o comportamento do material quando da aplicação das forças de roleteamento. Existem diversos tipos e concepções de geometria para virabrequins que variam em função do fabricante e da aplicação. Adicionalmente, o processo é regido por deformações plásticas na região do raio de concordância e conseqüentemente, modificações na geometria de todo o virabrequim como conseqüência das elevadas forças de roleteamento utilizadas.

### 4.1 Comprimento do Virabrequim

A **Figura 4.1** apresenta os resultados referentes ao comprimento do virabrequim em função do limite de resistência dos materiais utilizados e das diferentes forças de roleteamento empregadas. As propriedades dos virabrequins testados apresentam limite de resistência compreendido entre 950MPa e 1450MPa, e a força de roleteamento variada de 12 a 24kN.

Após a operação de roleteamento a maioria dos virabrequins testados apresentou redução no seu comprimento. Experimentos conduzidos por Wrigth *et. al.* [10] mostram aumento do comprimento de componentes submetidos ao roleteamento. Porém, observando os resultados obtidos nas medições, nota-se que um virabrequim não teve seu comprimento alterado, **Figura 4.1(a)**, e apenas um virabrequim apresentou aumento no comprimento após o processo de roleteamento, **Figura 4.1(b)**.





**Figura 4.1** – Comprimento do virabrequim em função do limite de resistência do material

Dependendo da intensidade das forças de roleteamento aplicadas e da resistência do material do virabrequim, este poderá ter seu comprimento aumentado ou reduzido. O roleteamento de um corpo de prova cilíndrico de revolução, em decorrência da simetria de aplicação da carga e da simetria de deformação sobre a circunferência do corpo de

prova, proporciona um aumento do comprimento deste. Esse aumento do comprimento é devido ao equilíbrio entre as tensões de compressão residuais introduzidas na camada limite externa do corpo de prova com as tensões trativas distribuídas na seção do núcleo.

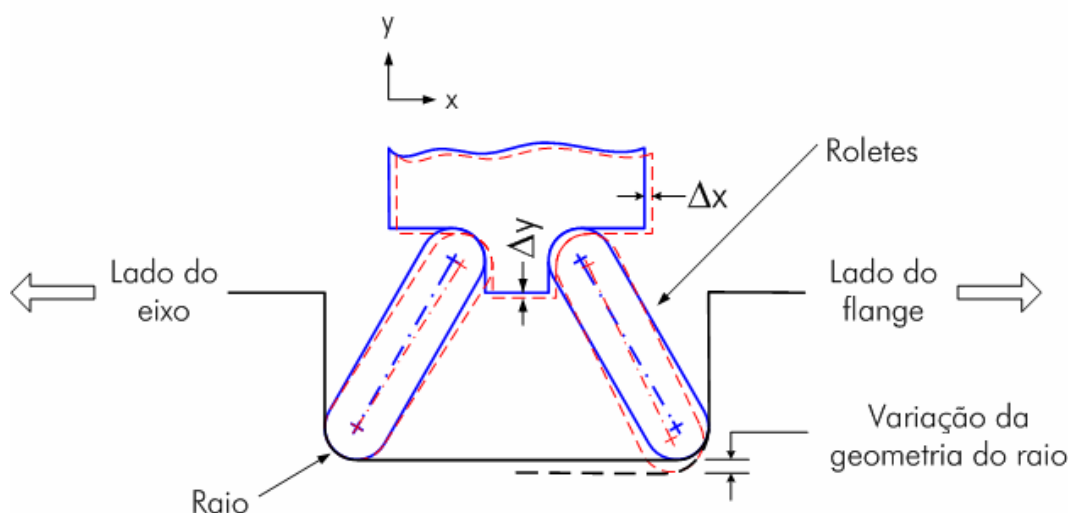
O virabrequim não possui uma simetria de rotação e seções bastante variáveis ao longo de seu comprimento. Devido a isto, a operação de roleteamento produz uma deformação das faces dos mancais, e principalmente dos munhões, o que leva a um desalinhamento do eixo do virabrequim, podendo ocorrer redução do seu comprimento. Como o roleteamento dos munhões é realizado com uma força em um determinado setor angular e outra força em outro setor angular, ocorre uma deformação desigual das faces que unem os mancais aos munhões. A direção da deformação destas faces associada à intensidade da força de roleteamento, contribui consideravelmente para a redução do comprimento do virabrequim após a operação.

A variação no comprimento do virabrequim é mais influenciada quando se utilizam materiais com limite de resistência menor. Os virabrequins de número 23 da **Figura 4.1(c)** e 34 da **Figura 4.1(d)** não apresentam a mesma tendência em relação à porcentagem de variação no comprimento quando comparados com os demais. Isto está relacionado ao efeito de descontinuidades presentes na micro-estrutura do material e também devido à variação das condições das ferramentas e do próprio raio de concordância, em função de variações dimensionais ocasionadas por operações de usinagem anteriores ao roleteamento.

O suporte onde os roletes são montados apresenta certo grau de deslocamento controlado durante a execução da operação. Com isso as ferramentas são capazes de se deslocar de maneira que ocorra um melhor ajuste na região do raio de concordância. Este ajuste é necessário para que haja uma compensação de posicionamento devido às diferenças existentes entre os raios do lado do flange<sup>3</sup> e do lado do eixo do virabrequim, como ilustrado na **Figura 4.2**.

---

<sup>3</sup> Conforme sistema de referência ilustrado na página 45.



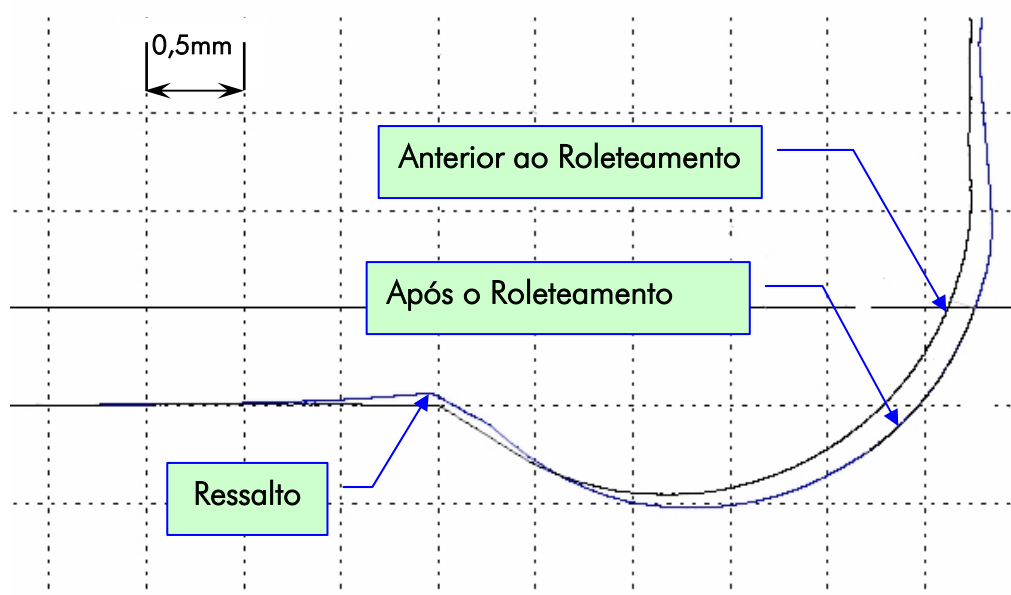
**Figura 4.2** – Compensação da variação dimensional do raio de concordância do virabrequim pelo auto-ajuste das ferramentas montadas no cabeçote de roleteamento

## 4.2 Raio de Concordância

As simulações de roleteamento nas superfícies da região do raio de concordância do virabrequim mostraram a ocorrência de deformações plásticas permanentes para as cargas de roleteamento de 12 a 24kN, empregadas nas simulações. Os ensaios de roleteamento realizados em virabrequins com limite de resistência de 950 a 1450MPa e com forças de roleteamento de 12 a 24kN, mostram que o perfil de deformação do raio encontrado no ensaio prático não coincide totalmente com a simulação. Porém, mostrou uma pequena elevação de material adjacente ao raio de concordância ao longo da extensão do mancal, concordando com os resultados observados por Wright *et. al.* [10], **Figura 4.3** e Figuras B1 e B2 do Anexo B.

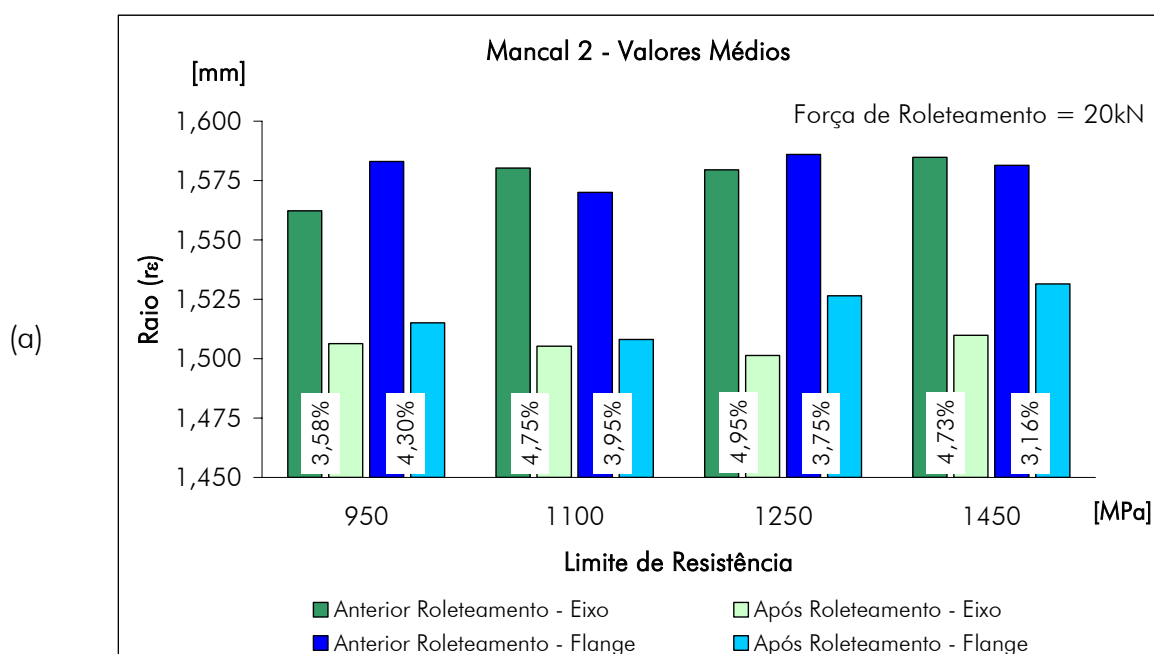
O perfil da região do raio de concordância obtido após a aplicação da força de roleteamento reproduz fielmente o encontrado na literatura. De acordo com Wright *et. al.* [10], a força de roleteamento associada ao rolamento dos roletes sobre a superfície do raio de concordância produz deslocamentos laterais de material, formando um ressalto adjacente à região do raio, como pode ser observado na **Figura 4.3**.

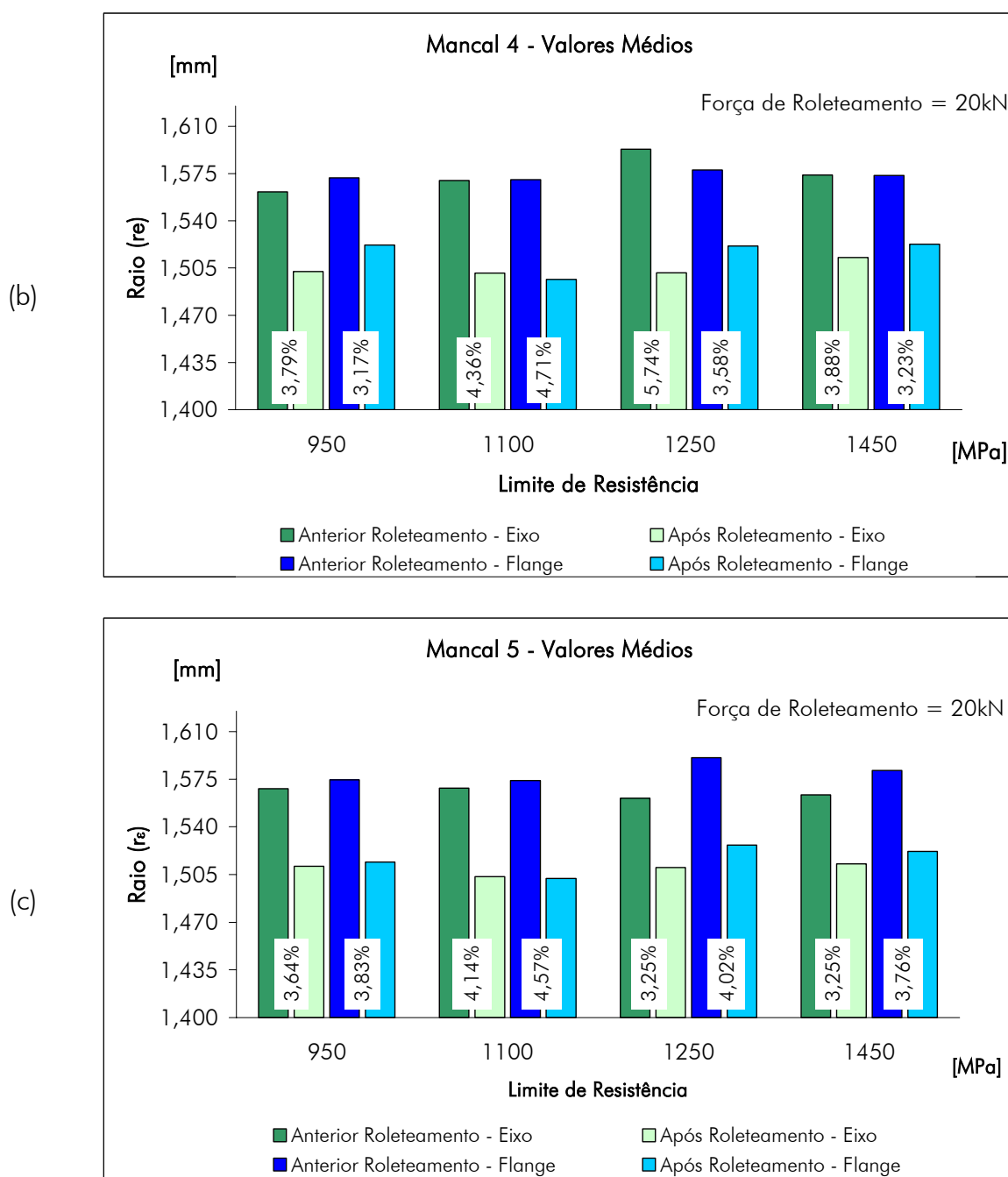




**Figura 4.3** – Perfis obtidos na medição do raio de concordância antes e após o roleteamento

Observou-se neste trabalho que todos os raios de concordância dos mancais submetidos ao processo roleteamento apresentaram redução no seu valor, tanto para os raios do lado do eixo como para os raios do lado do flange do virabrequim, **Figura 4.4**, coincidindo com os resultados dos ensaios práticos conduzidos por Wright *et. al.* [10].





**Figura 4.4** – Comportamento do raio de concordância em função do limite de resistência do material. (a) Mancal 2; (b) Mancal 4; (c) Mancal 5

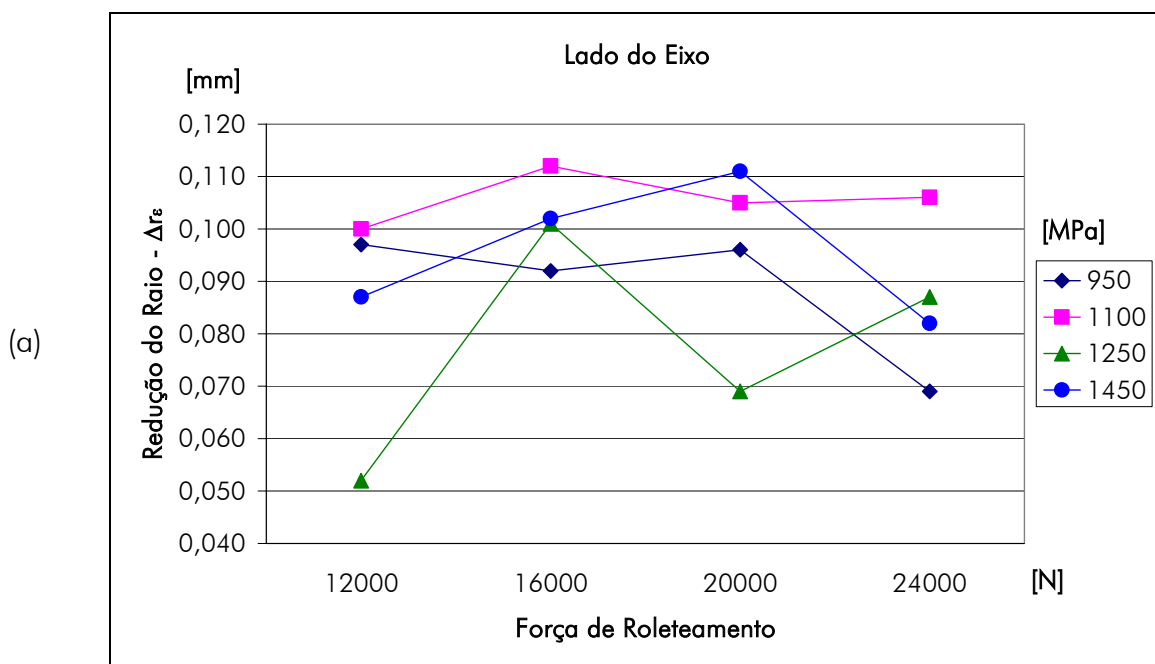
As diferenças encontradas nos valores entre o raio de concordância do lado do eixo e do lado do flange após o processo de roleteamento, são devidas às variações aleatórias do próprio raio em função dos processos de fabricação empregados, e

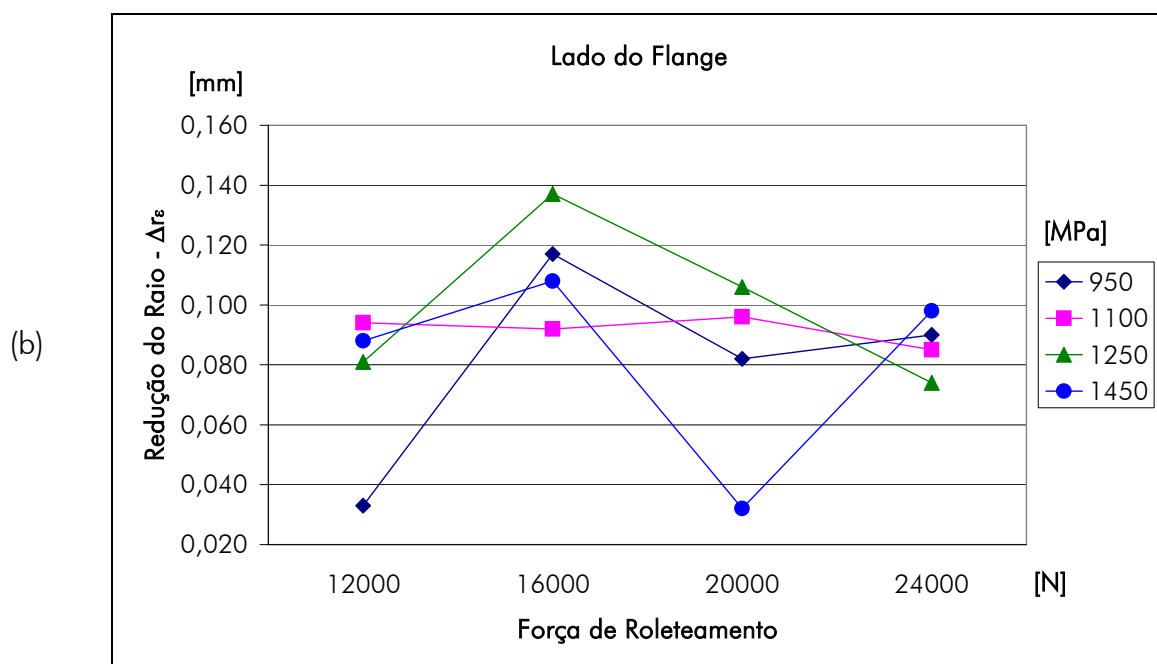
também do próprio sistema de ferramentas utilizado, como explicado com o auxílio da **Figura 4.2**. Valores de redução do raio de concordância dos mancais 2, 4 e 5 de todos os virabrequins, tanto do lado do eixo quanto do lado do flange, estão compreendidos entre 3,16% a 4,73% para os virabrequins com limite de resistência  $\sigma_R = 1450\text{MPa}$ , 3,25% a 5,74% para  $\sigma_R = 1250\text{MPa}$ , 3,95% a 4,75% para  $\sigma_R = 1100\text{MPa}$  e 3,17% a 4,30% para virabrequins com  $\sigma_R = 950\text{MPa}$ , como pode ser visto na **Figura 4.4**.

#### 4.2.1 Variação do raio de concordância com a força de roleteamento

Com o objetivo de avaliar o comportamento dimensional do raio de concordância em função da variação da força de roleteamento aplicada, foram realizadas medições em moldes obtidos nos corpos de prova submetidos ao roleteamento, conforme as condições de ensaio descritas na **Tabela 3.3**. A **Figura 4.5** apresenta os resultados obtidos referentes à variação do raio de concordância, tanto para o lado do eixo como para o lado do flange. Esta variação é dada pela diferença entre o raio de concordância anterior ao roleteamento e o raio de concordância após o roleteamento, **Equação (4.1)**:

$$\Delta r_{\varepsilon} = \text{Raio inicial} - \text{Raio final} \quad (4.1)$$





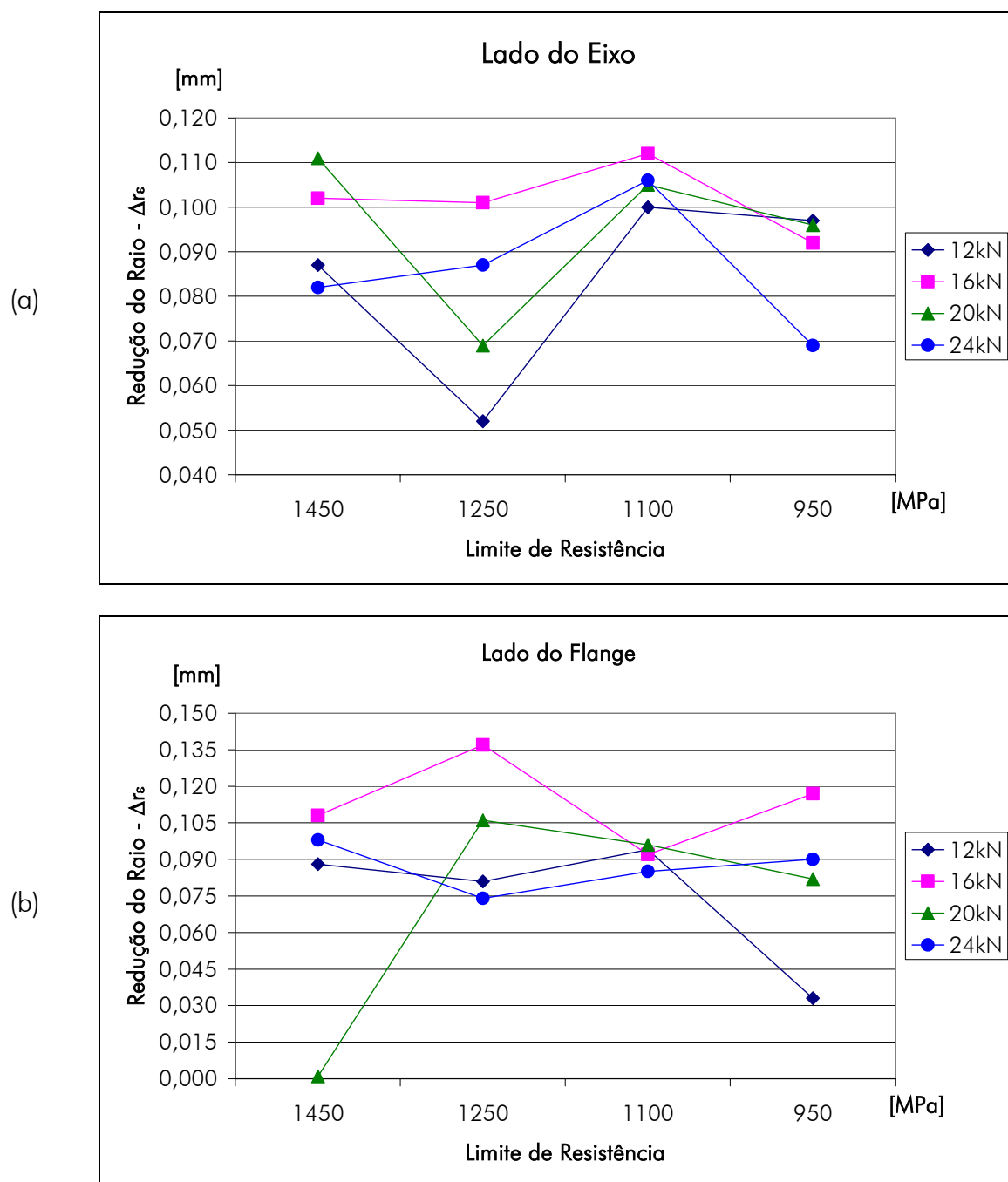
**Figura 4.5** – Comportamento do raio de concordância em função da força de roleteamento. a) Raios orientados para o lado eixo; b) Raios orientados para o lado do flange

Esperava-se uma tendência crescente para a variação no raio com o aumento da força de roleteamento, porém, os resultados não mostram esta tendência. Pequenas variações dimensionais dos raios antes do processo de roleteamento são responsáveis por esta falta dependência no comportamento da variação do raio. Variações dimensionais podem ter sido maiores que a faixa de compensação suportada pelas ferramentas, provocando diferenças nos valores obtidos nas medições.

#### 4.2.2 Variação no raio de concordância em função do limite de resistência do material

A **Figura 4.6** traz os resultados obtidos para os valores dos raios de concordância dos virabrequins testados em função do material utilizado para forças de roleteamento de 12kN, 16kN, 20kN e 24kN. O resultado esperado para a variação do raio de concordância no sentido de redução, era um valor crescente da variação com a redução da resistência do material utilizado para a mesma força de roleteamento utilizada. Porém,

observa-se que não existe uma tendência de redução bem definida, da mesma maneira que os resultados apresentados na Figura 4.5.



**Figura 4.6** – Variação do raio de concordância em função do material utilizado. a) Raios orientados para o lado do eixo; b) raios orientados para o lado do flange

### 4.3 Profundidade de Penetração da Ferramenta

A Figura 4.7 apresenta a profundidade de penetração dos roletes na peça em função do limite de resistência do virabrequim. Observa-se um aumento da profundidade de penetração à medida que o limite de resistência é menor, tanto para os raios orientados segundo a direção do eixo quanto do flange do virabrequim.

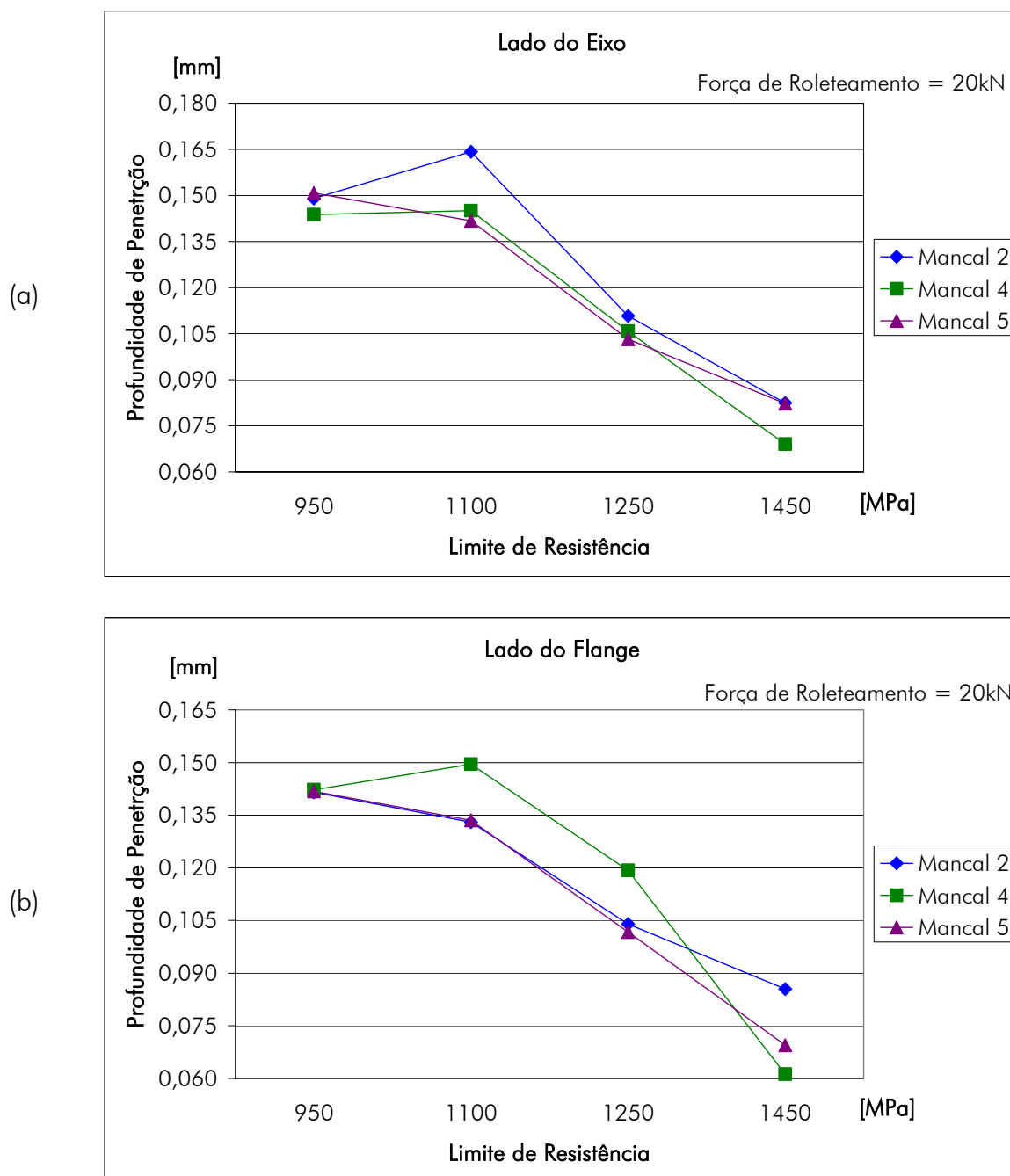
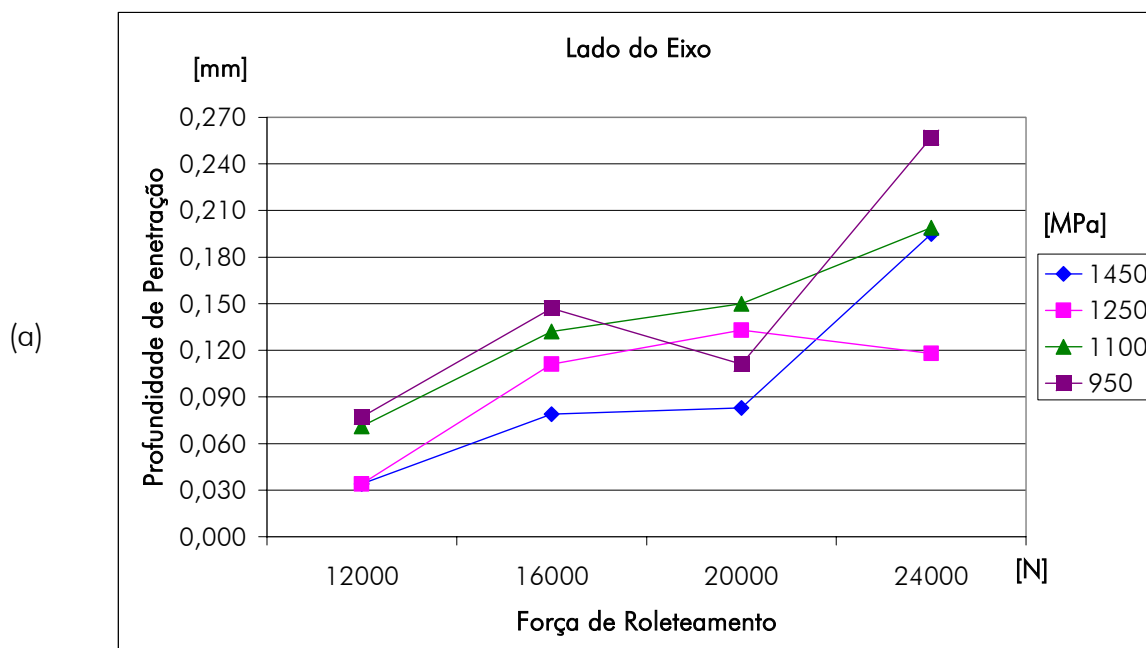


Figura 4.7 – Profundidade de penetração da ferramenta na peça com o limite de resistência

Verificam-se diferenças nos valores das profundidades de penetração nos raios orientados para o lado do eixo e nos raios orientados para o lado do flange, **Figura 4.7(a)** e **Figura 4.7(b)**. Estas diferenças estão associadas às variações dimensionais do raio de concordância antes da operação de roleteamento e têm influência sobre o alinhamento do virabrequim. Diferentes profundidades de penetração significam valores diferentes para as tensões residuais introduzidas na região do raio de concordância do virabrequim. Caso estas tensões residuais obtidas no material possuam valores muito baixos, haverá uma probabilidade maior de ocorrer a nucleação de trincas de fadiga nestas regiões.

A **Figura 4.8** mostra a variação da profundidade de penetração da ferramenta na peça com o aumento da força de roleteamento. Observa-se um aumento da deformação do raio com o aumento da força de roleteamento, o que era esperado. Entretanto, na **Figura 4.8(a)**, verifica-se uma redução no valor da profundidade de penetração para os virabrequins com limite de resistência de 950MPa e 1250MPa para forças de roleteamento de 20kN e 24kN, respectivamente. Esta diminuição do valor pode estar associada a erros durante o processo de medição ou devido à presença de alguma irregularidade não identificada na superfície do raio.



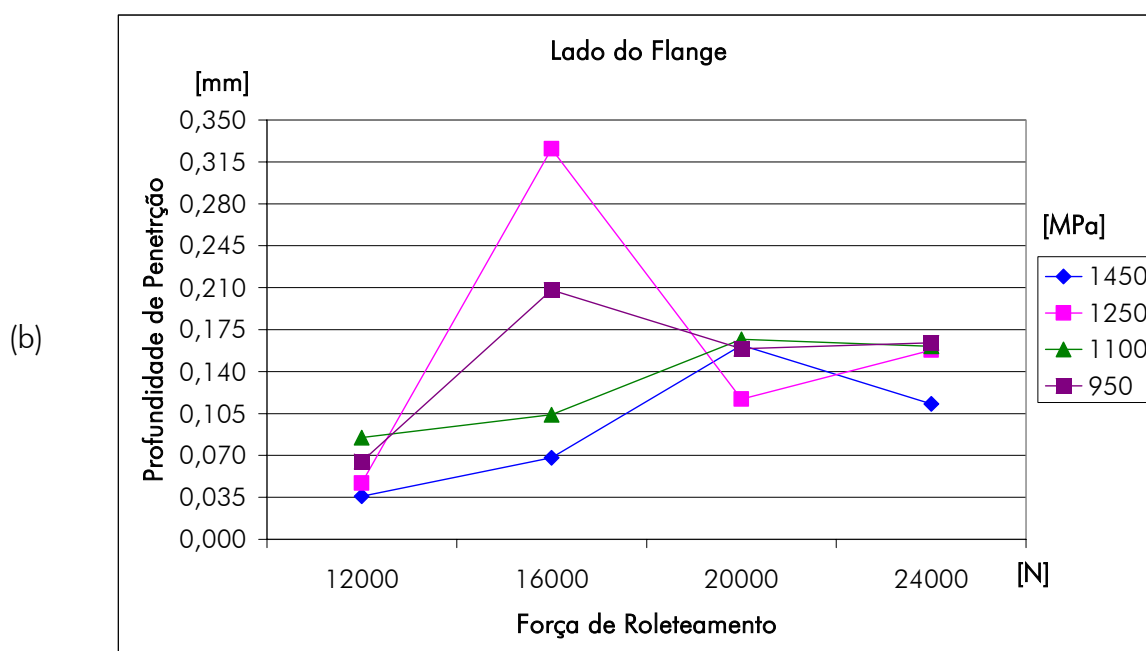


Figura 4.8 – Profundidade de penetração do rolete como função da força de roleteamento

Na figura **Figura 4.8(b)** é possível identificar um aumento exagerado no valor da profundidade de penetração para os mesmos virabrequins citados anteriormente, porém, apenas para a força de roleteamento de 16kN. Esta elevação abrupta pode ter sido ocasionada por irregularidades na superfície do raio ou pelo estado da superfície dos roletes utilizados. Estes valores que extrapolam o campo de resultados esperados estão associados a imperfeições e irregularidades presentes na micro-estrutura do material. Em função disto tem-se regiões onde o rolete imprime uma deformação maior na peça, podendo provocar o desalinhamento excessivo do virabrequim, principalmente dos mancais.

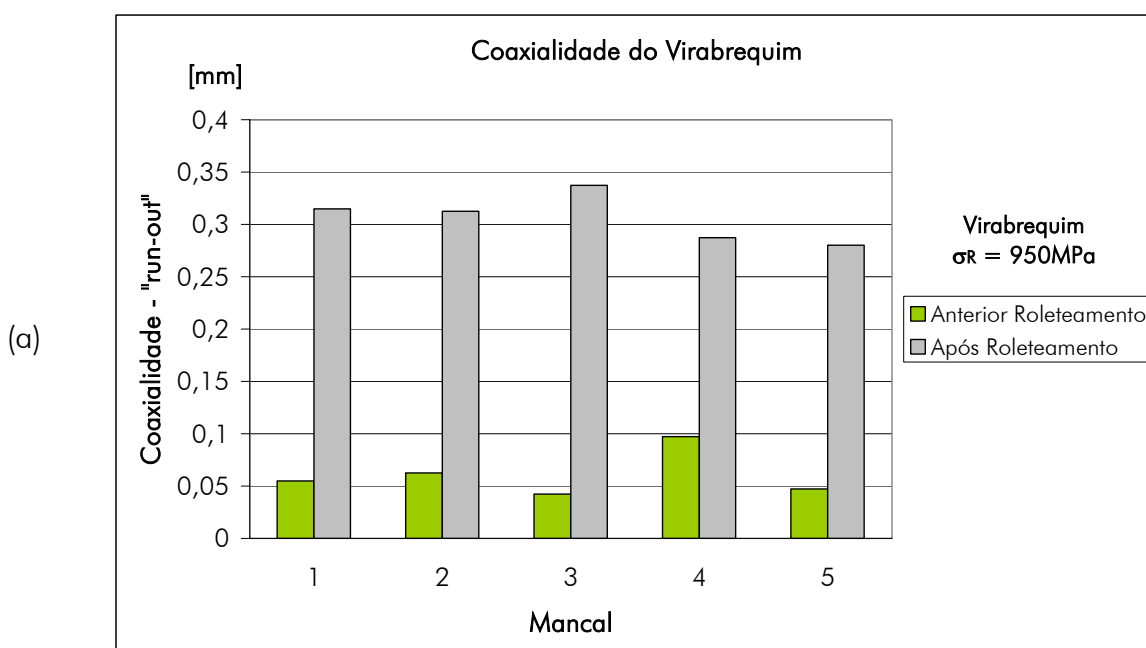
Outros fatores que influenciaram os resultados elevados da profundidade de penetração estão associados à técnica de medição e à resposta e aplicação correta da força por parte do sistema hidráulico.



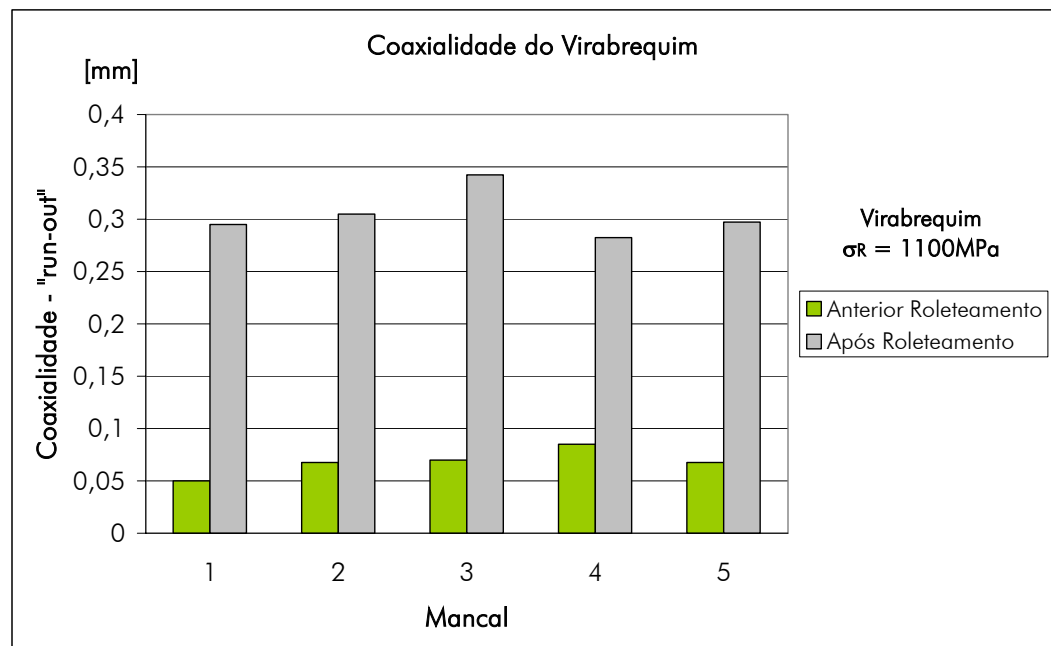
#### 4.4 Coaxialidade dos Mancais do Virabrequim

Através do processo de roleteamento é possível corrigir o desalinhamento dos mancais (*run-out*) do virabrequim em função de esforços de corte gerados em operações de usinagem anteriores à operação de roleteamento. Neste trabalho optou-se por não executar a correção da coaxialidade devido ao elevado tempo de preparação da bancada de testes, bem como a não disponibilidade de tempo hábil para efetuar novamente a operação de roleteamento em todos os virabrequins. Além de processos de fabricação anteriores, a própria operação de roleteamento conduz a um empenamento do virabrequim para certos níveis de força e características mecânicas do virabrequim.

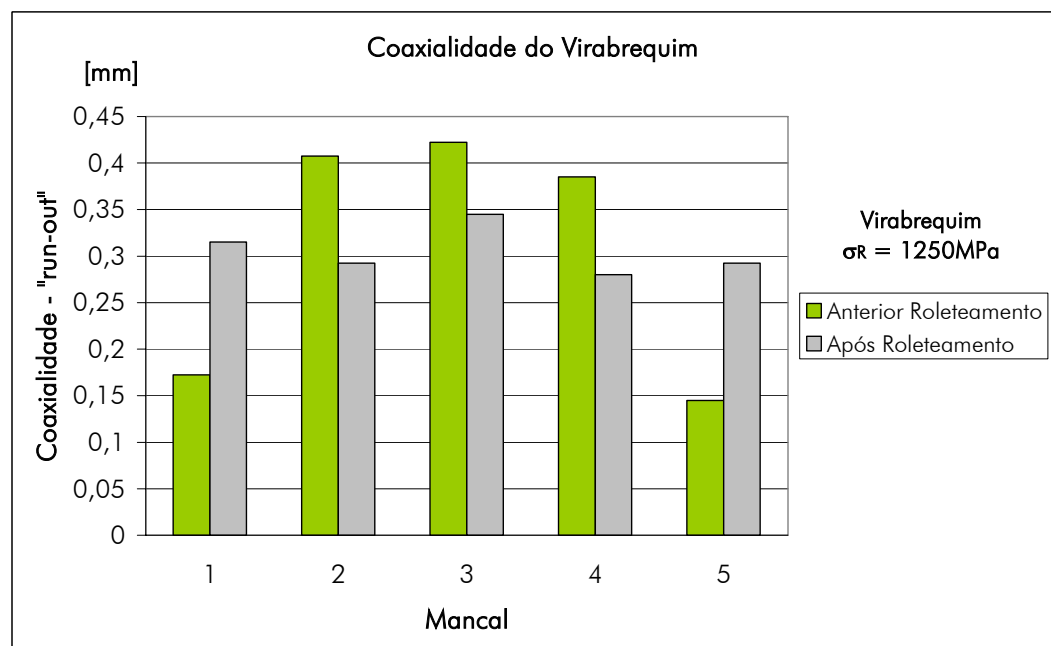
A **Figura 4.9** ilustra os resultados para a coaxialidade dos virabrequins submetidos aos testes práticos. É possível observar que virabrequins com limite de resistência menor possuem valores da coaxialidade maiores após o processo de roleteamento, **Figura 4.9(a)** e **Figura 4.9(b)**. Os valores de coaxialidade mais elevados indicam maior desalinhamento dos mancais do virabrequim após o processo de roleteamento, o qual deve ser corrigido através de um novo roleteamento e com níveis de força maiores. Em contrapartida, virabrequins com limite de resistência maior apresentam menores diferenças nos valores da coaxialidade antes e após o processo de roleteamento, **Figura 4.9(c)** e **Figura 4.9(d)**.



(b)



(c)



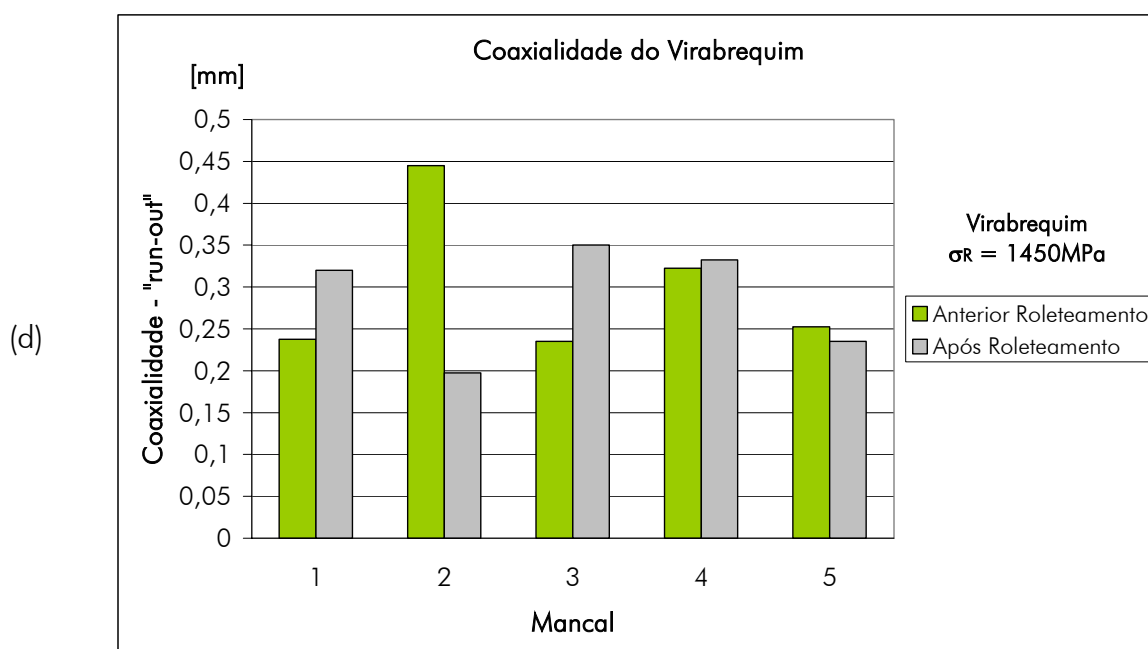
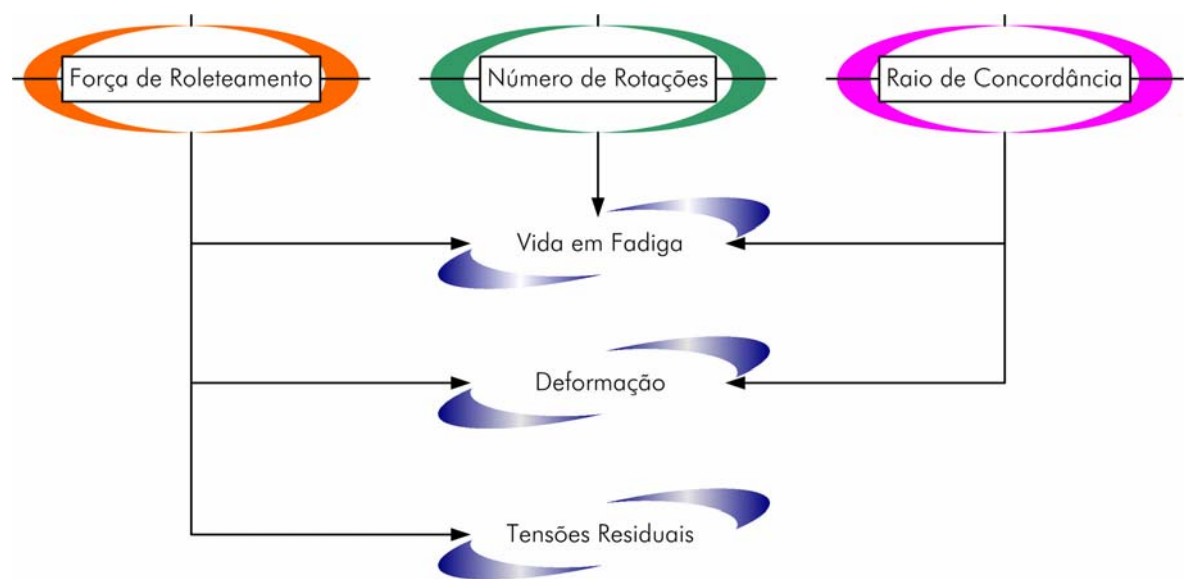


Figura 4.9 – Alinhamento dos mancais dos virabrequins – *run-out*

Pode-se observar também que, para os virabrequins com limite de resistência maior há certa regularidade para os valores máximos de coaxialidade dos mancais, após o processo de roleteamento. A execução de um único roleteamento já é capaz de corrigir o desalinhamento do virabrequim, ficando a critério dos limites de tolerância de projeto a aprovação, um novo roleteamento ou a rejeição do virabrequim.

#### 4.5 Correlação de Parâmetros no Processo de Roleteamento

Na tentativa de identificar com maior clareza os fatores que influenciam o resultado de trabalho no processo de roleteamento, propõe-se aqui uma metodologia para análise da operação baseando-se em discussões técnicas. Estas discussões técnicas foram realizadas com operadores de produção e responsáveis por projetos e aplicações das máquinas de roleteamento de virabrequins, além de informações encontradas nas referências. A **Figura 4.10** ilustra os parâmetros de maior influência no processo de roleteamento de virabrequins.



**Figura 4.10** – Variáveis de influência sobre o resultado de trabalho no processo de roleteamento

Segundo Friemuth *et. al.* [12], os valores das tensões residuais máximas encontradas são independentes da força de roleteamento. Contudo, é preciso compreender as operações de usinagem a que o material é submetido antes da operação de roleteamento. A não-dependência da tensão residual encontrada por Friemuth, *et. al.* [12] deve-se às elevadas tensões de tração introduzidas na superfície da peça durante as operações de usinagem anteriores ao roleteamento.

## 5 CONCLUSÕES

O completo conhecimento dos efeitos das variáveis e sua inter-relação com os mecanismos que regem um determinado fenômeno ou comportamento, nem sempre são obtidos facilmente. Entretanto, a identificação das possíveis variáveis de influência sobre um determinado processo, juntamente com o uso de técnicas de modelagem e simulação, é essencial para a compreensão dos resultados e para a tomada de decisões a respeito de uma determinada situação adversa, antes mesmo que ela aconteça.

Um dos objetivos traçados neste trabalho foi o levantamento de dados sobre a operação de roleteamento de virabrequins, para um melhor entendimento do processo. Apesar de o processo existir a algum tempo, não se dispõe ainda de informações completas sobre a operação. Diversos autores têm dedicado seus estudos ao efeito das tensões residuais sobre a resistência à fadiga de componentes mecânicos em geral e alguns poucos especificamente aos virabrequins submetidos ao processo de roleteamento.

Os resultados das medições dos ensaios em corpos de prova mostram que o virabrequim apresenta variação no seu comprimento durante a operação de roleteamento. Em todos os ensaios houve redução do comprimento dos virabrequins, com exceção de apenas um, que não teve seu comprimento alterado e outro virabrequim que apresentou um aumento no comprimento. Um fator de grande influência sobre a variação de comprimento é a magnitude da força de roleteamento, o que exige cuidadosa seleção desta variável de entrada. Variações elevadas no comprimento do virabrequim acarretam em complicações severas nas operações de usinagem posteriores, como na retificação. Quanto maior for a alteração no comprimento do virabrequim, maior será também o desalinhamento do mesmo. Caso esta deformação seja excessiva, poderá ocasionar problemas de interferência durante a montagem dos componentes no motor do automóvel.

A formação de pequenas elevações na porção cilíndrica adjacente ao raio de concordância é atribuída à movimentação angular do rolete durante as rotações do virabrequim. Estas irregularidades devem ser removidas pelos processos de usinagem posteriores ao roleteamento, e podem causar um desgaste desigual de rebolos utilizados nos processos de retificação. Estas protuberâncias podem ser controladas através da seleção adequada dos seguintes elementos em conjunto: força de roleteamento, velocidade de aplicação da força e rotação do virabrequim. Uma força de roleteamento muito elevada sendo aplicada com alta velocidade provoca o surgimento de endentações ao longo da superfície trabalhada já no início do processo. Estas endentações são responsáveis pela deformação e conseqüente quebra dos roletes. A rotação do virabrequim deve ser adequada, para que as regiões de aplicação de força sejam atingidas com precisão, pois, o sistema hidráulico de aplicação da força possui limitações quanto à atuação (resposta) em função dos estímulos (sinais) para início e parada do processo.

Os ensaios mostram um aumento da profundidade de penetração à medida que a força de roleteamento tem seu valor aumentado. Todos os virabrequins testados apresentaram redução no valor do raio de concordância após o roleteamento, estando em conformidade os resultados encontrados na literatura [9, 10]. A profundidade de penetração deve ser selecionada de tal forma que haja a formação de trincas e a conseqüente ruptura desta região do raio de concordância. Forças de roleteamento elevadas acarretam em deformações excessivas ocasionando o enfraquecimento das áreas submetidas ao roleteamento. A seleção do raio da ferramenta também é de extrema importância, uma vez que o mesmo interfere na deformação e também na vida em fadiga, tanto do virabrequim quanto do próprio rolete utilizado.

A perda de alinhamento dos mancais deve ser avaliada antes e após o processo de roleteamento. Os resultados mostram que virabrequins com características mecânicas distintas apresentam alterações significativas na coaxialidade dos mancais quando submetidos ao roleteamento. Além disso, virabrequins com elevados níveis de desvio no alinhamento dos mancais antes da operação de roleteamento, poderão apresentar

problemas após o roleteamento além de refugo em função da impossibilidade da correção da coaxialidade.

Hoje em dia as máquinas-ferramenta utilizadas para o roleteamento de virabrequins realizam a medição da coaxialidade dos mancais ao mesmo tempo em que as forças de roleteamento são aplicadas. Com isto, o controle é mais preciso e o tempo de retirada da peça da máquina é menor devido à realização de uma quantidade menor de medições.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O processo de roleteamento possui diversas variáveis de influência, e que atuam de maneira mais ou menos significativa. Uma das possibilidades para trabalhos futuros é realizar a simulação em elementos finitos tridimensional, e englobar o efeito do deslocamento dos roletes sobre a superfície do raio de concordância do virabrequim, com o objetivo de avaliar a deformação do raio de concordância e também do restante do virabrequim.

Devido à carência dos dados de não-linearidade do material dos virabrequins ensaiados, é necessário fazer um levantamento das características no regime plástico do material e alimentar o software de elementos finitos com estes dados. Desta maneira, ter-se-ia uma simulação com um grau de precisão maior.

Os ensaios até agora realizados restringem-se a uma velocidade. O estudo da influência da velocidade de roleteamento permitirá otimizar o tempo da operação nas aplicações industriais e avaliar seus efeitos sobre a vida em fadiga e deformações resultantes do virabrequim. A conclusão da bancada de roleteamento e sua caracterização em ensaios permitirá ampliar os estudos iniciados na Hegenscheidt-MFD. O projeto e a construção de um sistema para ensaios de vida em fadiga de virabrequins baseado na frequência de ressonância, poderá fornecer dados mais completos a respeito da influência do roleteamento sobre as características de vida de um virabrequim.

## 6 REFERÊNCIAS

- 1 Randlett, Everett. **Deep Rolling of Crankshafts**. Technical Paper – Engineering Conferences – (SME) Society of Manufacturing Engineers, p. 1 – 22.
- 2 Branco, C. A. G. de Moura. **Mecânica dos Materiais**. 3ª ed. Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian, 1998. 1080p.
- 3 Shigley, Joseph E., Mischke, Charles R., Budynas, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª ed. Porto Alegre. Bookman, 2005. 960p.
- 4 ASM Handbook. **Failure Analysis and Prevention**. 9ª ed. Vol. 11. ASM International, 1992.
- 5 Purdue University College of Engineering. <http://www.engineering.purdue.edu>. Acesso em: 20/09/2005.
- 6 Maluf, Omar. **Influência do Roletamento no Comportamento em Fadiga de um Ferro Fundido Nodular Perlítico**. USP, São Carlos, 2002. 116p., Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.
- 7 Tbynemotorsports. <<http://www.tbynemotorsports.com>>. Acesso em: 11 de setembro de 2005.
- 8 Ecoroll-AG. **Lecture 6090e**. <<http://www.ecoroll.com>>. Acesso em: 19 de agosto de 2005.



- 9 Wright, D. H., Love, R. J. and Nixon, J., **Improvement of Fatigue Strength by Fillet Rolling** – Five Cast Irons and a Cast Steel. MIRA Report 1960/6, December 1960. 25p.
- 10 Wright, D. H., Willn, J. E., and Love, R. J., **Equipment and Techniques for Cold Rolling. A summary of MIRA work**, 1964/1. December 1963. 20p.
- 11 **Deep Rolling Tools** – Deep Rolling Brochure from Hegenscheidt-MFD, Erkelenz, Germany, December 2002. 18p. Hegenscheidt-MFD GmbH & Co. KG. [Hegenscheidt.MFD@HME.Vossloh.com](mailto:Hegenscheidt.MFD@HME.Vossloh.com)
- 12 Friemuth, T., Winkler, J., **Como melhorar as Peças de Magnésio por Roleteamento**. Revista Máquinas e Metais. Março de 2000, ano XXXVI nº 410. pág. 52 a 61.
- 13 Ecoroll-AG. <<http://www.ecoroll.com>>. Acesso em: 19 de agosto de 2005.
- 14 Massué, N., Khanfir, H., Taleb, L., Arnoult, E., **Simulation Numérique du Galetage** – Impact de différents paramètres sur la tenue de l’outil. Coloque de Giens, p. 1-6, 2005.
- 15 Massué, N., Khanfir, H., Taleb, L., Arnoult, E., **Correlation Between Metallurgical Observations and Numerical Simulation of Fillet Rolling in Crankshafts**. To be published. Renault SA France, LMR INSA Rouen, France and UTC Compiègne, France.
- 16 Boeira, Angelo M. G., **Modelagem e Simulação do Fresamento Externo Excêntrico de Virabrequins**. Florianópolis, 2002, 127ff. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina.
- 17 Holand, I., Bell, K., **Finite Element Methods in Stress Analysis**. Second printing, Trondheim – Norway. Tapir Forlag, 1970.

- 18 Spiteri, P., Ho, S., Lee, Yung-Li, **Assesment of Bending Fatigue Limit for Crankshaft Sections with Inclusion of Residual Stresses**. International Journal of Fatigue, p. 1-12, 2006.
- 19 Fancello, Eduardo A., Mendonça, Paulo T. R., **Introdução à Mecânica dos Sólidos Computacional**. Florianópolis, 2001. Apostila, Grupo de Análise e Projeto Mecânico (Departamento de Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina.
- 20 Chien, W. Y., Pan, J., Close, D. and Ho, S., **Fatigue Analysis of Crankshaft Sections Under Bending With Consideration of Residual Stresses**. International Journal of Fatigue. p. 1-19, 2005.
- 21 Shaw, B. A., Aylott, C., O'Hara, P., Brimble, K., **The Role of Residual Stress on the Fatigue Strength of High Performance Gearing**. International Journal of Fatigue 25. p. 1279-1283, 2003.
22. Lindemann J., Grossmann K., Raczek T., Wagner L., **Influence of Shot Peening and Deep Rolling on High Temperature Fatigue of the Ni-Superalloy Udimet 720 LI**. To be published. Technical University of Brandenburg at Cottbus, Cottbus, Germany and Rolls-Royce Deutschland, Dahlewitz, Germany.

## 7 PROJETO DE UMA BANCADA DE ROLETEAMENTO

A experiência adquirida durante os ensaios de roleteamento de virabrequins realizados na Hegenscheidt-MFD, bem como a avaliação dos resultados obtidos nas simulações, permitem delinear o projeto de uma bancada de roleteamento a ser empregada na continuação dos trabalhos iniciados nesta dissertação. A disponibilidade de módulos de projetos oriundos de antigas máquinas-ferramenta e também a disponibilidade de guias lineares, permitiram conceber uma unidade de roleteamento para a qual a Hegenscheidt-MFD forneceu um braço articulado de roleteamento e uma válvula direcional proporcional. Esta válvula permite a aplicação de forças de roleteamento variáveis ao longo de uma rotação do virabrequim. Recursos do Projeto Verde Amarelo desenvolvido com a Renault do Brasil S.A. foram utilizados na aquisição de ferramentas de roleteamento, acionamento elétrico eletronicamente comandado para o giro do virabrequim e um sistema hidráulico de alta pressão para a aplicação das forças de roleteamento.

A **Figura 7.1** apresenta uma concepção geral da bancada de ensaios. Em detalhe, a **Figura 7.2** ilustra o cabeçote rotativo com quatro faixas de rotação comandadas por embreagens eletromagnéticas, acrescido de duas faixas de rotação por chaveamento mecânico. O cabeçote era parte integrante de um torno húngaro Czèpel.

A **Figura 7.3** apresenta as guias lineares para fixação e movimentação do braço articulado de roleteamento. Esta guia poderá receber um acionamento elétrico com comando eletrônico ou operar de modo manual para efetuar a operação de roleteamento em um mancal ou munhão específico do virabrequim.

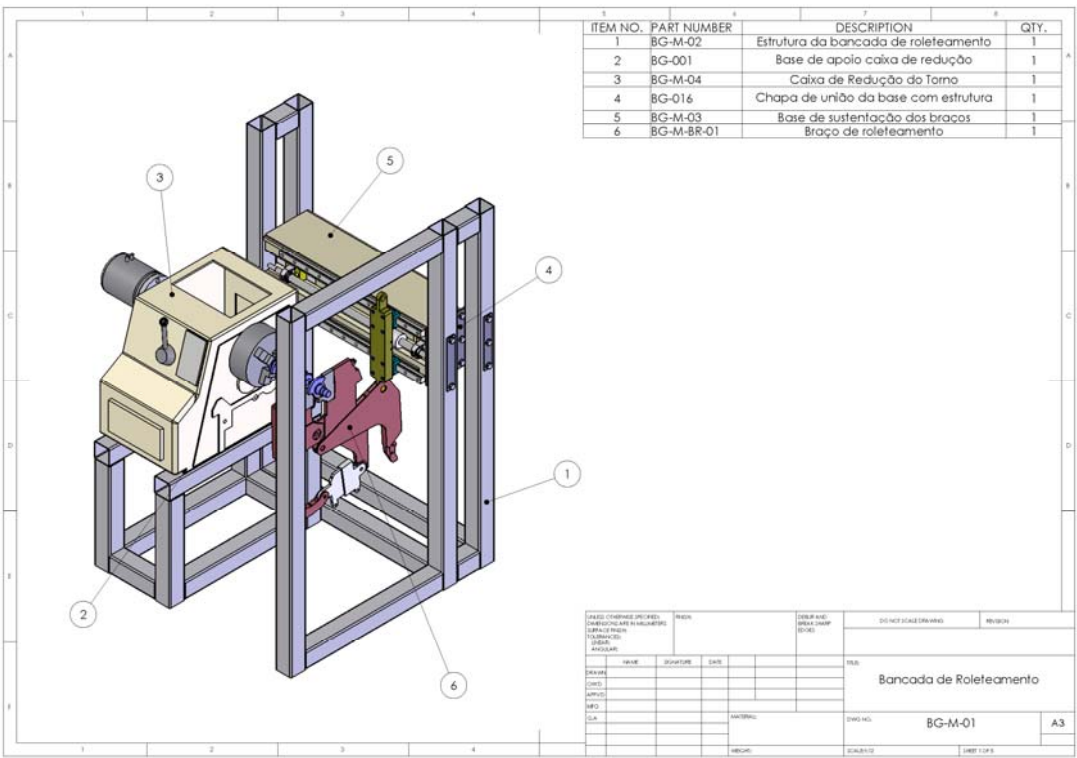


Figura 7.1 – Concepção da bancada de roleteamento

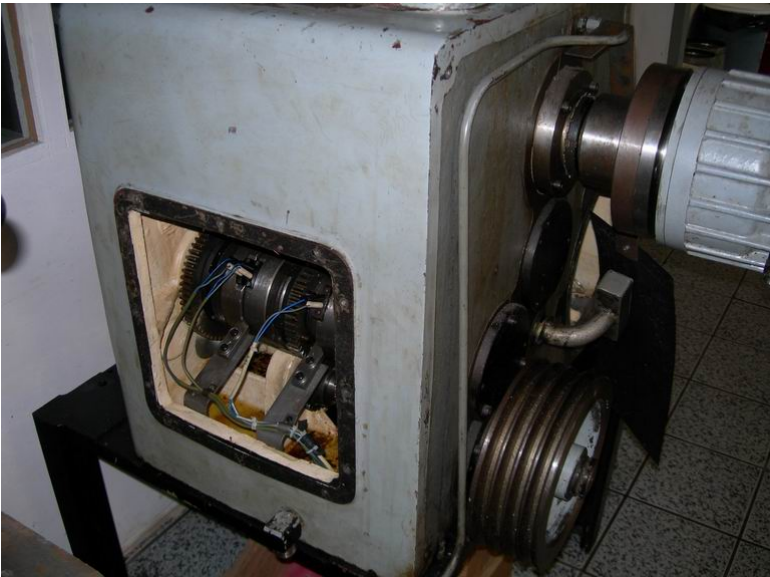


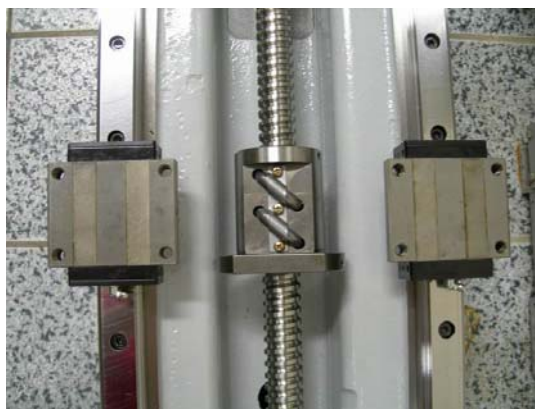
Figura 7.2 – Cabeçote de acionamento para a bancada de roleteamento



(a)



(b)



(c)



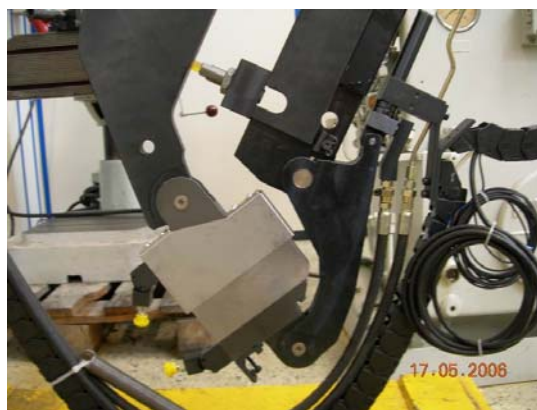
(d)

**Figura 7.3** – Sistema de guias lineares para fixação e movimentação do braço de roleteamento

A **Figura 7.4(a)** e **(b)** mostram o braço articulado com acionamento hidráulico para aplicação da força de roleteamento. É possível notar também o mecanismo de posicionamento e fechamento do braço. Na **Figura 7.4(c)** pode-se observar o pistão pneumático para compensação da massa do dispositivo para permitir o roleteamento excêntrico dos munhões. A **Figura 7.4(d)** ilustra o local de fixação do cabeçote de roleteamento.



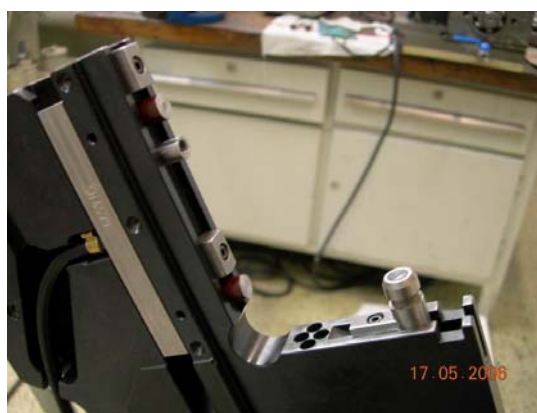
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 7.4** – Braço articulado para a bancada de ensaios de roleteamento

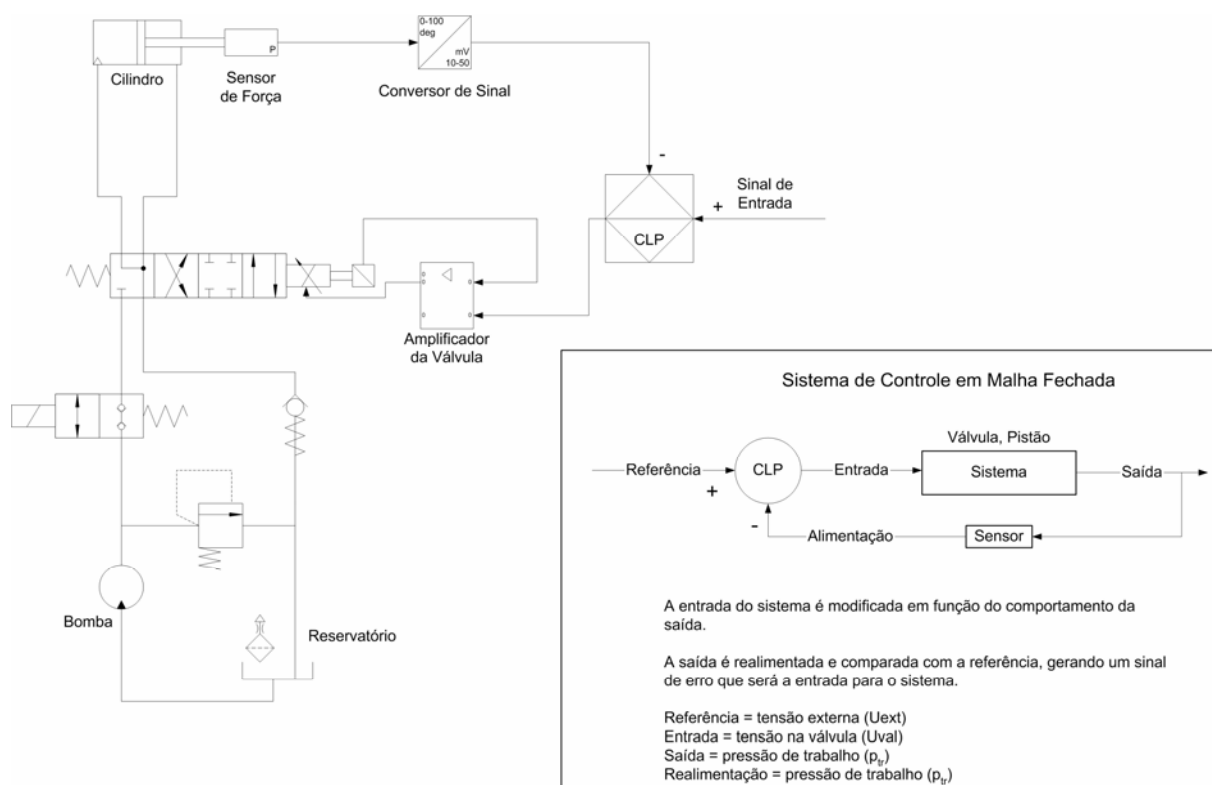


Figura 7.5 – Diagrama hidráulico do cilindro de aplicação da força de roleteamento

Diagrama Hidráulico do Cilindro de Fechamento do Braço de Roleteamento

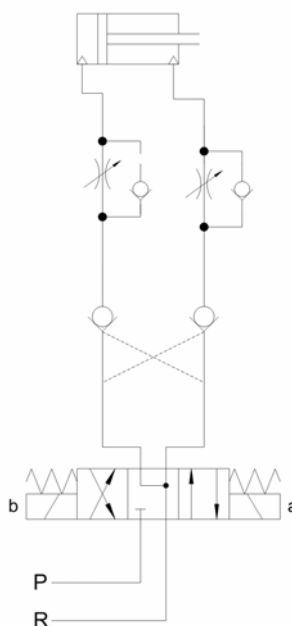


Figura 7.6 – Esquema hidráulico do sistema de posicionamento dos braços de roleteamento

ANEXOS



## Anexo A – Características dos equipamentos de medição utilizados

**Betriebsanleitung**

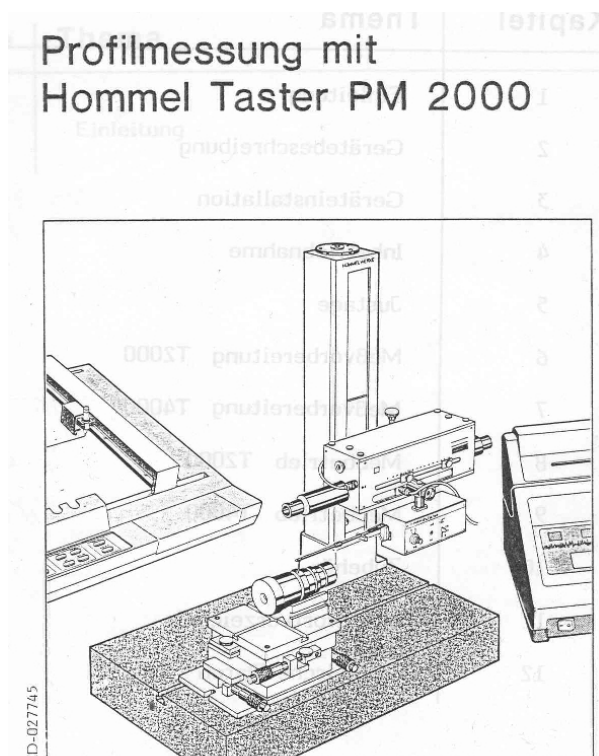
**Digitales Höhenmessgerät GARANT HC1**



**Garant®**  
DIE MARKE DER HOFFMANN-GRUPPE

<b>Höhenmeßgerät HC 1</b>	
Meßbereich	600 mm
Meßbereich (obere Meßeinsatzaufnahme)	335 mm ... 935 mm
Meßunsicherheit $u_{95}$ (20 °C, Meßplatte GK 0, Standard Meßeinsatz K10/50)	(2 + L / 400) $\mu$ m (L in mm)
Rechtwinkligkeitsabweichung	frontal: < 8 $\mu$ m
(Mit Meßplatte der Güteklasse 0 und nur bei Einsatz eines korrigierten, elektronischen Meßsystems an der X-Achse, z.B. einem inkrementalen oder induktiven Taster.)	
Wiederholbarkeit $\pm 2 \sigma$	auf Fläche: 0,5 $\mu$ m, in Bohrung: 1,0 $\mu$ m
Meßkraft (Standardtaster)	1 N $\pm$ 0,2 N
Antastgeschwindigkeiten	5, 8, 10, 12, 15, 30 mm/s
3-Punkt-Luftkissen, Höhe	ca. 2 ... 5 $\mu$ m
Integrierte Pumpe für Luftkissen	Luftlager aus Nirostastahl X90 CRMOV18
Betriebsdauer mit geladenem Akku	8 ... 15 Stunden (je nach Arbeitsweise)
Auswechselbare Meßeinsätze	siehe "Zubehör"
Vertikales Meßsystem der Säule	inkrementaler Maßstab mit optischer Abtastung
Aufnahme für horizontale Meßsysteme	siehe "Zubehör"
Max. zulässige Positioniergeschwindigkeit des Schlittens bei Handbetätigung	600 mm/s
Dauerschalldruckpegel	< 70 dB (A)
Arbeitstemperatur	20 °C $\pm$ 1 °C
Betriebstemperatur	10 °C ... 40 °C
Lagertemperatur	-40 °C ... 60 °C
zulässige relative Luftfeuchtigkeit	max. 65 % (nicht kondensierend)
Maße (L x B x H)	24 cm x 25 cm x 100 cm
Masse	ca. 30 kg
<b>Bedien- und Auswertegerät HD 1</b>	
Tastatur	Folientastatur mit Druckpunkt
Schnittstellen	RS-232 (Computer, Drucker oder Fußschalter)
	Centronics (Drucker)
Eingänge für Meßgeräte	4
An Kanal 2 anschließbare Meßgeräte	– Mahr-Meßuhr, digital (Millitast 1082, 1085)
(zweite Achse, z.B. für Rechtwinkligkeitsmessungen)	– Mahr-Inkrementaltaster (Millitron 1501, 1512, 1525, 1591)
	– Mahr-Induktivtaster mit $\pm 2$ mm Meßweg (anschließbar über Millitron-Anzeigegerät oder Meßverstärker)
Schutzart	IP 54
Abmessungen (L x B x H)	23 cm x 19 cm x 12,5 cm
Masse	ca. 2 kg
<b>Stecker-Netzgerät</b>	
Netzspannung / Netzfrequenz	230 V ( $\pm 10$ %) / 50 Hz
Leistungsaufnahme	25 VA
Stecker	Euro-Norm
Schutzart	IP 20
Schutzklasse	II
Masse	ca. 0,5 kg

Figura A1 – Equipamento de medição de distância digital



Taster PM 2000		Technische Daten	12 - 1
Technische Daten:			
<b>HOMMEL TESTER PM 2000</b>		<b>HOMMEL PLOTTER PT</b>	
Verwendungszweck	: Abtastung der Konturen an Werkstückprofilen	Zeichenfläche	: 287 x 410 mm (10,5" x 16,1")
Tasthub	: 3, 5, 10, 20 mm	Papierformat	: A3 (Papier, Folien)
Tastarmlänge	: 35, 150, 380 mm, je nach Meßhub abhängig vom Vorschubgerät	Papierhalterung	: elektrostatisch
Taststrecke	: stufenlos einstellbar bis 250 mm	Stifte	: 6 Filzstifte, 1 Lupe
Tastgeschwindigkeit	: 0,2 mm/s 2 mm/s zum Einrichten variabel einstellbar	Plotgeschwindigkeit	: 1 - 50 cm/s, (Vektoren) programmierbar
Tastspitze	: Hartmetall	Auflösung	: 0,025 mm
Tastspitzenlänge	: 5, 22, 35 mm	Wiederholgenauigkeit	: < 0,1 mm (gleicher Filzstift)
Tastspitzenwinkel	: 11 Grad	Eingangspuffer (Speicher)	: 32 kByte
Tastspitzenradius	: 20 µm ± 5 µm	Programmiersprache	: HP - GL (kompatibel zu HP 7475 A) STD-GL
Tastkraft	: 0,02 - 0,06 N einstellbar	Hilfsprogramme	: Selbstdokumentation Testzeichnung
Tastarmabhebung	: automatisch bei Rücklauf, oder manuell mittels Kippschalter	Schnittstelle	: V. 24 (RS 232)
Abtastwinkel	: max. 77 Grad bei ansteigender Flanke, max. 88 Grad bei abfallender Flanke	Protokollierung	: Profilschrieb Titel (alphanumerisch) Radien, Länge, Höhe, Strecken, Winkel Skalierung mm/inch Vergrößerungsmaßstäbe Meßbedingungen
Vibrator	: für steile, raue Flanken läßt sich die Amplitude über einen Drehknopf stufenlos einstellen	Vertikalvergrößerung	: 1 - 200fach (automatisch)
Empfindlichkeit	: 0,00750 mV/µm	Horizontalvergrößerung	: 1 - 200fach
Meßsystem	: induktiv	Registrierengenauigkeit	: horizontal 0,2 % vertikal 0,8 %
Anschluß	: an HOMMEL-TESTER T 2000/T 4000	Abmessungen	: Breite 555 mm Höhe 170 mm Tiefe 483 mm
Synchronisierung	: Meßwertaufnahme synchronisiert mit der Vorschubbewegung		
Abmessungen	: Breite 32 mm Tiefe 160 mm Höhe 55 mm		

Figura A2 – Perfilômetro utilizado na medição do perfil do raio de concordância

Anexo B – Modelo do perfil do raio de concordância obtido a partir do perfilômetro e o resultado da medição do raio e da profundidade de penetração.

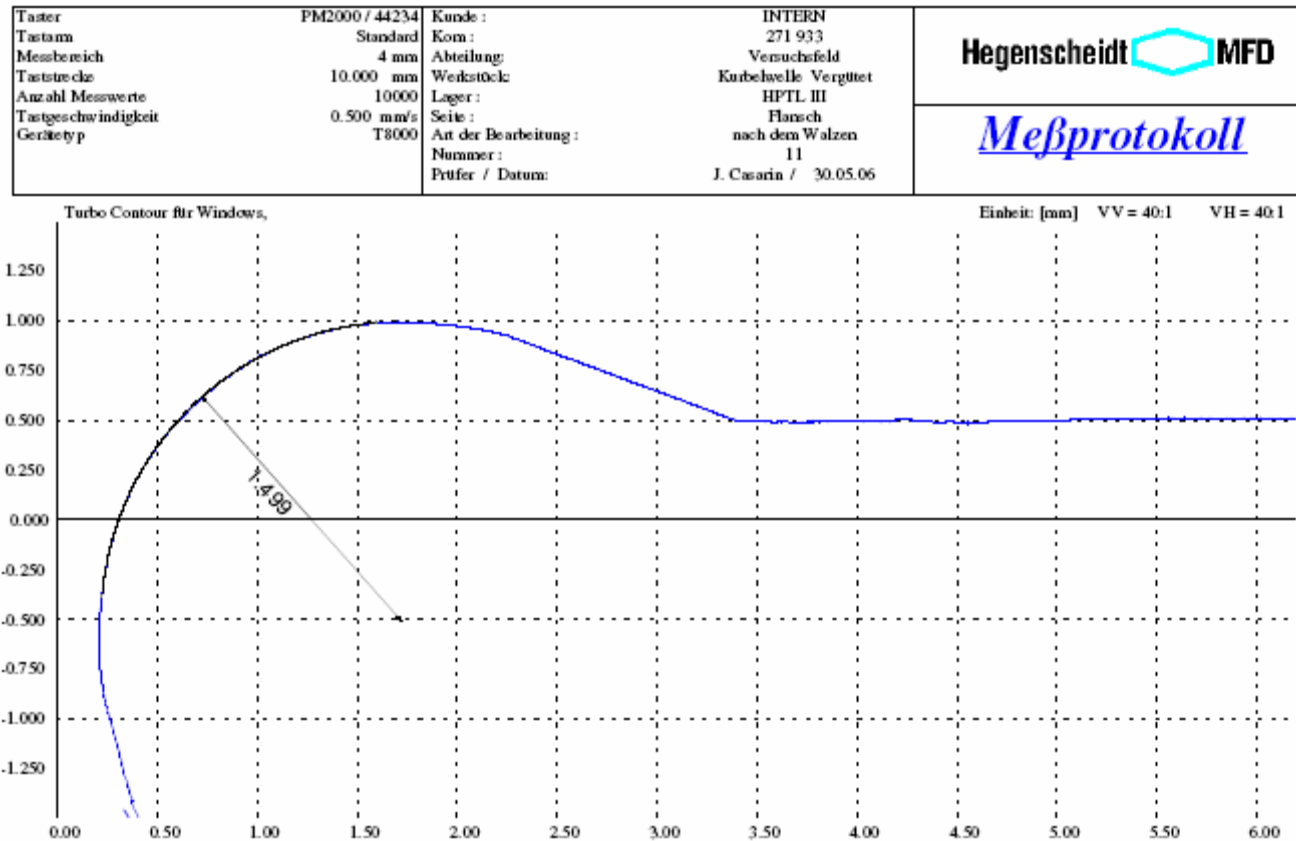


Figura B1 – Medição do raio de concordância do virabrequim

Taster	PM2000 / 44234	Kunde :	INTERN
Tastarm	Standard	Korn :	271 933
Messbereich	4 mm	Abteilung:	Versuchsfeld
Taststrecke	10.000 mm	Werkstück:	Kurbelwelle Vergütet
Anzahl Messwerte	10000	Lager :	HPTL V
Tastgeschwindigkeit	0.500 mm/s	Seite :	Flansch
Gerätetyp	T8000	Art der Bearbeitung :	vor > nach dem Walzen
		Nummer :	34
		Prüfer / Datum:	J. Casarin / 30.05.06

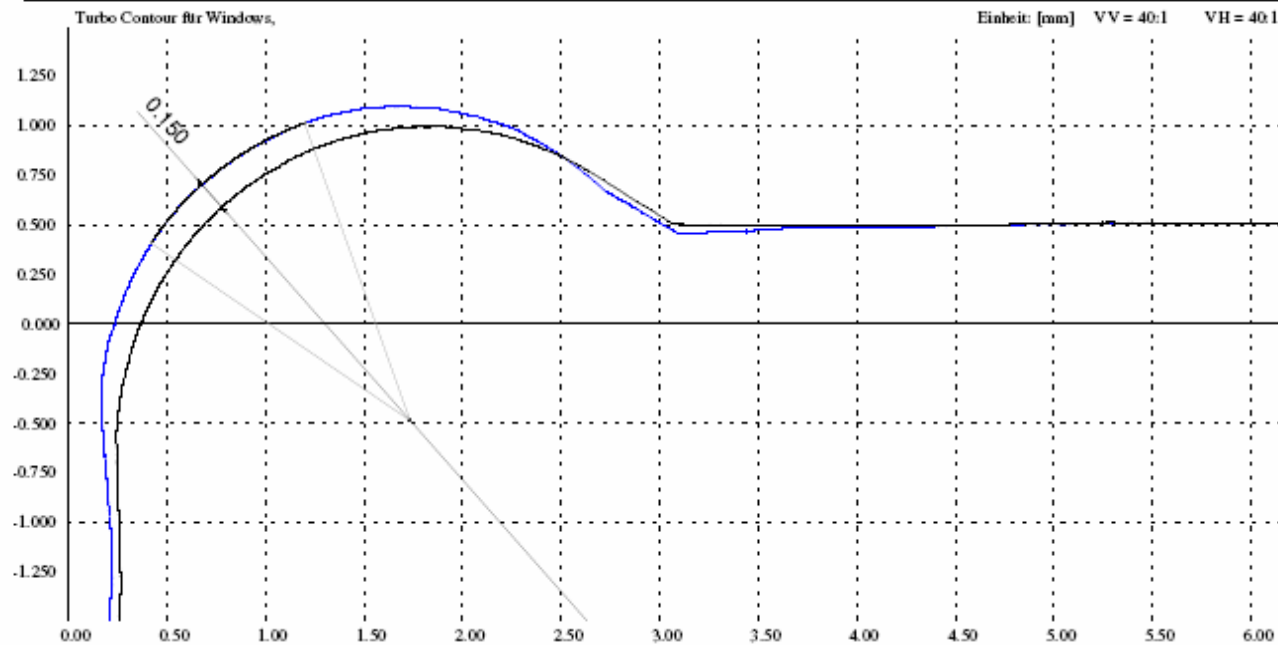
Hegenscheidt  MFDMeßprotokoll

Figura B2 – Medição do raio de concordância do virabrequim antes e após o roleteamento